

Anna Nyholm

**Elektromigraation vaikutus juoteliitosten mekaaniseen
ja termomekaaniseen luotettavuuteen**

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 11.5.2012.

Työn valvoja:

Prof. Mervi Paulasto-Kröckel

Työn ohjaaja:

DI Juha Karppinen



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu

Tekijä: Anna Nyholm		
Työn nimi: Elektromigraation vaikutus juoteliitoksen mekaaniseen ja termomekaaniseen luotettavuuteen		
Päivämäärä: 11.5.2012	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 7+76
Elektroniikan laitos		
Professuuri: Bioadaptiivinen tekniikka		Koodi: S-113
Valvoja: Prof. Mervi Paulasto-Kröckel		
Ohjaaja: DI Juha Karppinen		
<p>Tässä työssä tutkittiin elektromigraation vaikutusta Sn3.0Ag0.5Cu -juoteliitoksen luotettavuuteen mekaanisessa ja termomekaanisessa rasituksessa. Elektromigraation vaikutus pyrittiin saamaan esiin vertaamalla suurille virrantiheyksille altistettuja kokoonpanoja hehkuttamalla esivanhennettuihin sekä käsittelemättömiin. Lisäksi työssä tutustuttiin kirjallisuusselvityksen avulla juoteliitosten keskeisiin luotettavuusongelmiin sekä kiihdytettyyn elinikätestaukseen luotettavuuden arvioinnissa. Esikäsittely DC-virtarasituksella näytti parantavan juoteliitoksen termomekaanisen rasituksen kestoja. Esikäsittelemättömien ja hehkutettujen testikokoonpanojen vikaantuminen aiheutui lähdejuotteen murtumisesta uudelleenkiteytyneiden alueiden raerajoja pitkin, mutta DC-virtarasitetut näytteet eivät vikaantuneet testissä. Eri esikäsittelyn kokoneiden testikokoonpanojen välillä havaittiin selviä eroja juotteen mikrorakenteessa ja rakenteen muutos lämpösyklauksessa näytti etenevän hitaammin DC-virtarasitetussa liitoksessa.</p> <p>Mekaanisessa rasituksessa puolestaan havaittiin eroja eri esikäsittelyn kokoneiden liitosten vikaantumistavassa. Sekä pudotus- että tärytystestissä esikäsittelemättömissä näytteissä murtuma kulki nielujuotteessa metallinvälisen yhdistekerroksen rajapinnan tuntumassa ja hehkutetuissa puoliksi juotteen ja Cu₆Sn₅-yhdisteen välistä rajapintaa pitkin. DC-virtarasitetuissa näytteissä sen sijaan murtuma kulki lähes ainoastaan bulkkijuotteessa kaukana rajapinnoista. Oletettavasti juotteen mikrorakenteen karkeutuminen esikäsittelyissä pehmensi juotetta ja sai murtuman kulkemaan juotteessa IMC-kerrosten sijaan.</p> <p>Elektromigraation havaittiin parantavan juoteliitoksen termomekaanisen kuormituksen kestoja, ja mekaanisessa kuormituksessa vaikuttavan vikaantumistapaan. Tämän työn tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa elektromigraation vaikutusta juoteliitoksen luotettavuuteen elektroniikkalaitteiden tyyppillisessä käyttöympäristössä. Tuloksia voidaan hyödyntää myös yhdistelmätestien suunnittelussa, kun halutaan ottaa huomioon käyttökohteen kokemat korkeat virrantiheydet.</p>		
Avainsanat: DC-virtarasitus, elektromigraatio, juoteliitos, luotettavuus, lyijytön, yhdistelmätestaus		

Author: Anna Nyholm		
Title: Effect of electromigration on the mechanical and thermo-mechanical reliability of solder joints		
Date: 11.5.2012	Language: Finnish	Number of pages: 7+76
Department of Electronics		
Professorship: Bioadaptive technology		Code: S-113
Supervisor: Prof. Mervi Paulasto-Kröckel		
Instructor: M. Sc. Juha Karppinen		
<p>The focus of this work was to investigate the effect of electromigration on the mechanical and thermo-mechanical reliability of Sn3.0Ag0.5Cu solder joints. Effect of electromigration was studied by comparing samples that have had DC current stressing as pre-treatment to those which have experienced annealing aging or no pre-treatment at all. In addition, a literature review was conducted to analyze the main reliability issues of solder joints and accelerated life tests.</p> <p>The results indicated that DC current aging improved the thermo-mechanical reliability of solder joints. The failure mode of the as-reflowed and annealed samples was found to be recrystallization-assisted crack propagation in the source interconnection. The DC current stressed samples did not fail during the test. Distinct differences were observed in the microstructure between the samples that had experienced different pre-treatments. The microstructural evolution of the solder matrix was observed to have advanced slower in the DC current stressed samples.</p> <p>In mechanical loading tests differences on the failure modes were found between the samples that had experienced different pre-treatments. In as-reflowed samples under both drop and vibration tests the crack propagated in bulk solder close to the interface between the solder bulk and the intermetallic layer. In annealed samples the crack propagated partly along the interface. In contrast, in DC current stressed samples the crack propagated almost entirely in the bulk solder away from interfaces. Presumably coarsening of the solder microstructure during the pre-treatments softened the solder which caused the crack to propagate in the bulk instead of the IMC-interface.</p> <p>Electromigration was found to improve the thermo-mechanical reliability of solder joints and to affect the failure mode in mechanical loading. The results of this thesis can be utilized to evaluate the effect of electromigration on the reliability of solder joints in typical operational environment of electronic assemblies. The results can also be used in designing combined reliability tests when wanting to take the high current density the device is experiencing into consideration.</p>		
Keywords: DC-current stressing, electromigration, lead-free, multiple loading tests, reliability		

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun Elektroniikan integroinnin ja luotettavuuden yksikössä osana Suomen Akatemian rahoittamaa projektia ”Mechanism and control of electromigration in solder interconnections under power loading”. Haluan kiittää työni valvojaa Mervi Paulasto-Kröckeliä mahdollisuudesta työskennellä tässä projektissa kiinnostavan aiheen parissa.

Työni ohjaajaa diplomi-insinööri Juha Karppista tahdon kiittää kannustavasta ja asiantuntevasta ohjauksesta. Hänen väsymätön tukensa sekä erinomaiset ohjeet ja neuvot työstäni olivat korvaamattoman suureksi avuksi. Kiitos myös dosentti Tomi Laurilalle diplomityötäni koskevista kommentteista. Elektroniikan laitoksen koko henkilökuntaa haluan kiittää mukavasta työilmapiiristä ja avusta käytännön asioissa.

Lopuksi tahdon kiittää perhettäni ja ystäviäni kannustuksesta koko opintojeni aikana. Manulle haluan antaa suuret kiitokset avusta työn oikolukemisessa ja tuesta etenkin työn hankalissa vaiheissa. Erityisen kiitoksen ansaitsevat vielä äiti, Tanja ja Pekka arvokkaasta lapsenvahtiavusta työn aikana.

Otaniemi, 11.5.2012

Anna Nyholm

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe.....	iv
Sisältö	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Kiihdytetty elinikätestaus.....	2
2.1 Juoteliitosten luotettavuus	3
2.2.1 SnAgCu –juote.....	3
2.2.2 Luotettavuusongelmat.....	5
2.2 Lämpösyklus	7
2.3 Isoterminen hehkutus	12
2.4 Pudotustesti	12
2.5 Tärytys.....	14
2.6 DC-virtarasitus	15
2.7 Yhdistelmätestaus	16
3 Elektromigraatio	18
3.1 Elektromigraatioteorian perusteet	19
3.1.1 Diffuusio	19
3.1.2 Elektromigraation ajava voima.....	20
3.1.3 Jännitysgradientti	22
3.1.4 Virran ahtautuminen	24
3.2 Elektromigraatio juoteliitoksissa.....	24
3.2.1 Alhainen sulamispiste ja nopea atomidiffuusio	26
3.2.2 Virran ahtautuminen	27
3.2.3 Metallienvälisten yhdistekerrosten kasvu	29
3.2.4 Juotteen sulaminen.....	31
4 Työn tarkoitus	33

5 Tutkimusmenetelmät.....	34
5.1 Testirakenne ja esivanhennukset.....	34
5.2 Lämpösyklitestit.....	37
5.3 Pudotustesti.....	38
5.4 Tärytystesti.....	40
5.5 Juoteliitosten tutkiminen mikroskopiolla.....	42
6 Tulokset.....	44
6.1 Esikäsittelyjen vaikutus mikrorakenteeseen.....	44
6.1.1 Ei esikäsittelyä.....	45
6.1.2 Hehkutus.....	46
6.1.3 DC-virta-asetus.....	48
6.2 Lämpösyklitestit.....	50
6.3 Pudotustesti.....	53
6.4 Tärytystesti.....	58
6.5 Tulosten tarkastelu.....	63
7 Yhteenveto.....	68
Viitteet.....	70

Symbolit ja lyhenteet

D	aineen diffuusiokerroin
F	voima
F_{EM}	elektromigraation ajava voima
F_{σ}	jännitysgradientti
ΔQ	aktivaatioenergia
j	virrantiheys
k_T	keskimääräinen terminen energia
l_B	Blechin pituus
ρ	resistiivisyys
σ	hydrostaattinen jännitys
v_D	massan kulkeutumisnopeus
Ω	aktivaatiotilavuus
Z^*	elektromigraation efektiivinen varausluku
BCT	tilakeskinen tetragonaalinen hilarakenne (engl. body centered tetragonal)
BGA	komponenttityyppi, jossa juotenystyt on ryhmitelty riveihin kotelon alle (engl. ball-grid array)
CTE	lämpölaajenemisen kerroin (engl. coefficient of thermal expansion)
DC	tasavirta
EIA	Electronic Industries Alliance
FR4	Flame Retardant 4 – luokituksen saanut lasikuiduilla vahvistettu epoksi- harts
HALT	erittäin kiihdytetty usean kuormitusparametrin luotettavuuden arviointi- menetelmä (engl. highly accelerated life testing)
IMC	metallienvälinen yhdiste (engl. intermetallic compound)
IPC	Institute for Interconnecting and Packing Electronic Circuits
ISO	International Standards Organization
JEDEC	Solid State Technology Association (originally Joint Electron Device Engineering Council)
MOSFET	kanavatransistori (engl. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)
NEMI	National Electronics Manufacturing Initiative
RMS	neliöllinen keskiarvo (engl. root mean square)
SAC	SnAgCu, eli tinasta, hopeasta ja kuparista koostuva juote
SEM	pyyhkäisyelektronimikroskooppi (engl. scanning electron microscope)
UBM	juotenystyn alusmetallointi (engl. under bump metallization)

1 Johdanto

Elektroniikkateollisuudessa kehityksen suuntana on jo pitkään ollut yhä pienemmät ja enemmän toimintoja sisältävät kokoonpanot. Kehitys on johtanut komponenttiliitosten virrantiheyden sekä lämpötilan voimakkaaseen kasvamiseen, mikä on erityisen haastava yhdistelmä laitteiden luotettavuuden kannalta – elektromigraatiosta juoteliitoksissa on tullut elektroniikkakokoonpanojen luotettavuusongelma. Elektromigraatio on elektroni-vuon aikaansaamaa metalli-ionien liikettä johtimissa. Juoteliitosten luotettavuus on erit-täin keskeistä laitteille; yksittäisenkin juotenystyn yhteyden katkeaminen komponentin ja piirilevyn välillä voi aiheuttaa jonkin toiminnon menettämisen tai jopa koko laitteen vikaantumisen.

Korkea virrantiheys ei kuitenkaan ole ainoa rasitus, jolle laitteet käyttöympäristös-sään tavallisesti altistuvat. Etenkin kannettavat elektroniikkalaitteet kohtaavat käyttösä aikana vaihtelevia ja vaativia rasituksia, kuten putoamisesta johtuva iskukuormitus ja komponenttien sisäisestä lämpenemisestä aiheutuvat lämpötilanvaihtelut. Yhdistämällä näitä tyypillisiä rasitustiloja voimakkaaseen virtarasitukseen, saadaan paremmin todelli-suutta vastaavaa tietoa elektromigraation vaikutuksesta laitteiden luotettavuuteen. Tässä työssä tutkitaan elektromigraation vaikutusta Sn3.0Ag0.5Cu -juoteliitosten luotettavuuu-teen mekaanisessa ja termomekaanisessa rasituksessa. Testikokoonpanot altistetaan en-sin voimakkaalle virtarasitukselle elektromigraation aiheuttamiseksi, jonka jälkeen juo-teliitosten kestävyyttä arvioidaan lämpösykli- pudotus- ja tärytystestillä.

Voimakkaassa virtarasituksessa juotteiden luotettavuuteen vaikuttaa elektromigraati-on lisäksi voimakas lämpötilan nousu. Työn tavoitteena on saada elektromigraation vai-utus esille vertaamalla suurille virrantiheyksille altistettuja kokoonpanoja samansuu-ruisessa lämpötilassa esivanhennettuihin sekä kokonaan esikäsittelemättömiin testikap-paleisiin. Virtarasitetut, hehkutetut ja esikäsittelemättömät kokoonpanot altistetaan luo-tettavuustesteihin, joiden tuloksia vertaillaan toisiinsa. Näin pyritään saamaan selville, vaikuttaako suurilla virrantiheyksillä rasittaminen juotteen elinikään sekä vikaantumis-tapaan.

Työ jakautuu kahteen osaan: kirjalliseen ja kokeelliseen. Kirjallisessa osassa kerro-taan ensin työssä käytetystä SnAgCu -juotteesta ja tutustutaan juoteliitosten luotetta-vuusongelmiin sekä kiihdytettyyn elinikätestaukseen luotettavuuden arvioinnissa. Tä-män jälkeen perehdytään elektromigraatioteorian perusteisiin ja ilmiön vaikutuksiin juoteliitoksissa. Kokeellisessa osiossa esitellään työn tarkoitus ja käytetyt esivanhennus-sekä luotettavuustestimenetelmät, jonka jälkeen tarkastellaan kokeista saatuja tuloksia. Tulosten esittely on jaettu neljään osaan eri luotettavuustestien sekä mikrorakenteellisen muutosten mukaan, joiden jälkeen näitä tuloksia vertaillaan toisiinsa. Lopuksi työstä esitetään vielä yhteenveto.

2 Kiihdytetty elinikätestaus

Elektroniikkavalmistajien on kannattavaa valmistaa kuluttajille riittävän luotettavia tuotteita, joten ne on testattava ennen myyntiin tuomista. Hyvän yritysimagea lisäksi luotettavuustestauksen motivaationa on raha: ongelmien korjaamisen kustannukset nousevat eksponentiaalisesti tuotteen edetessä elinkaartaan valmistuksen, testauksen ja kuljetuksen kautta kuluttajan käyttöön. Siten on tärkeää havaita ongelmat mahdollisimman varhain. [1] Luotettavuutta voidaan pitää ajasta riippuvana käsitteenä, jossa tuotteen tulee kyetä toimimaan halutulla tavalla tietyissä olosuhteissa määritellyn elinaikansa ajan [2]. Kulutuselektroniikan vaadittu käyttökelpoinen elinikä on suhteellisen lyhyt, vain kolmesta viiteen vuotta [3].

Elektroniikkalaitteiden ja -komponenttien pitkän aikavälin vikaantumismekanismeja ei testata normaaleissa toimintaolosuhteissa, sillä testin vaatima aika olisi aivan liian pitkä. Testausprosessia nopeutetaan tavallisesti altistamalla testikappaleet normaalia käyttöympäristöä huomattavasti suuremmalle rasitukselle, jolloin aiheutetaan vikaantuminen lyhyessä ajassa. Näiden kiihdytettyjen elinikätestien tavoitteena on tuottaa kiihdytysty samat vikaantumismekanismit kuin käyttöolosuhteissa.

Nykyisten elektroniikkalaitteiden käyttöolosuhteet voivat olla hyvinkin monimuotoiset sekä vaihdella suuresti eri sovellusten välillä. Ei siis voida kehittää mitään yksittäistä testiä arvioimaan kaikkien tuotteiden luotettavuutta, vaan testit tulee valita sovelluskohdasta vastaamaan mahdollisimman tarkasti laitteen todellista käyttöympäristöä. Testi tulee suunnitella siten, että se tuottaa jonkin havaittavan ja mitattavan muutoksen testikappaleen toiminnassa. Lisätty rasitus voi olla esimerkiksi kemiallinen, mekaaninen, termien tai sähköinen, ja sen tulisi olla helposti lisättävissä, kontrolloitavissa ja mitattavissa. Rasitustasojen ankaruus ja testin kesto riippuvat tuotteen käyttökohteesta; esimerkiksi kuluttajasovellusten, armeijalaitteiden ja sairaalavarusteiden luotettavuusvaatimukset ovat aivan erilaiset. [1]

Luotettavuuden arviointiin on kehitetty useita kokeellisia työkaluja, kuten lämpösyklus, värinätestaus, erilaiset korroosiotestit ja pudotustestaus. Testissä voidaan myös yhdistää useita eri rasituksia, jolloin puhutaan yhdistelmätesteistä. Arvioitaessa minkä tahansa elektroniikkalaitteessa käytettävän osan luotettavuutta, on keskeistä ymmärtää arviointiin käytettävien testimenetelmien toiminta, niillä saatavan tiedon laatu sekä tulosten sovellettavuus. Vaikka halutaankin nopeita luotettavuusarvioita, niiden tuomat edut häviävät, jos vikaantumismekanismit eivät vastaa todellisuutta eivätkä viittaa kenttäkäytössä ilmeneviin vikoihin.

Kulloinkin käytettävä testimenetelmä tulee valita huolella. Jotta kiihdytetty testi olisi tarkoituksenmukainen ja tulokset päteviä sekä suhteutettavissa normaaleihin rasisvikiin, sen tulee täyttää tietyt kriteerit [1]:

1. Havaittu vikaantumismekanismi testikappaleessa on sama kuin normaaleissa käyttöolosuhteissa.
2. Testattavan tuotteen eliniän ja testissä käytetyn rasituksen välillä tulee olla riippuvuus. Tällöin kiihdytetyn testin tuloksista voidaan päätellä tuotteen elinaika normaaleissa olosuhteissa.
3. Kiihdytetyssä rasituksessa olevien testikappaleiden vikaantumiseen kuluva aika noudattaa jotakin tunnettua tilastollista jakaumaa.
4. Havaittuun vikaantumiseen johtavat fysikaaliset tekijät ja niiden vaikutus testirakenteen elinikään tunnetaan. Jos lisätyn rasituksen vaikutuksia ei täysin ymmärretä, saatetaan testissä aiheuttaa vikaantumismekanismi jota ei ilmene normaalissa käyttörasituksessa. Tällöin tulokset eivät selity tai ovat virheellisiä.
5. Testitulokset pidetään rakennekohtaisina. Jos testirakennetta muutetaan esimerkiksi komponenttien sijoittelua tai materiaaleja vaihtamalla, tulokset eivät välttämättä enää päde.

Lisäksi testauksen tulisi olla kaupallisiin tarkoituksiin riittävän nopeaa, edullista ja toistettavaa. Testin toistettavuuteen ja luotettavuuteen ovat apuna erilaiset standardit, jotka muodostavat tarkkaan määritellyn perustan tietynlaisille testiolosuhteille. Tällöin tietyn standardin mukaan eri toimijoiden testaamia tuotteita voidaan luotettavasti vertailla toisiinsa. Elektroniikkateollisuudessa tuotteita harvoin valmistetaan ja testataan itse alusta asti samassa paikassa, jolloin standardit ovat hyvänä apuna muualta hankittavien osien vertailussa ja luotettavuuden varmistamisessa. Monet teollisuusryhmät kehittävät standardeja luotettavuuden arviointiin elektroniikkateollisuudelle. Tunnetuimpiin organisaatioihin kuuluvat muun muassa JEDEC (Solid State Technology Association), IPC (Institute for Interconnecting and Packing Electronic Circuits), EIA (Electronic Industries Alliance), ISO (International Standards Organization) ja NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative) [2].

2.1 Juoteliitosten luotettavuus

Juottaminen on elektroniikassa pitkään käytössä ollut edullinen ja luotettava liitosmenetelmä. Siitä on käytössä useita eri versioita, joista käytetyimpiin kuuluvat reflow- ja aaltojuottaminen. Juoteliittämisessä keskeinen prosessi on kuparikontaktin ja juotemetallin välinen kemiallinen reaktio, jossa ne muodostavat vahvan sidoksen metallienvälisillä yhdisteillä eli IMC-kerroksilla (*intermetallic compound*). IMC-kerros on kuitenkin mekaanisesti hauras, joten liian paksu kerros heikentää koko juoteliitoksen luotettavuutta etenkin iskumaisessa kuormituksessa. Metallien välisen yhdistekerroksen paksuus onkin keskeinen tekijä liitoksen luotettavuudelle, joten sen kasvun kontrollointi juotosprosessissa on tärkeää.

2.2.1 SnAgCu -juote

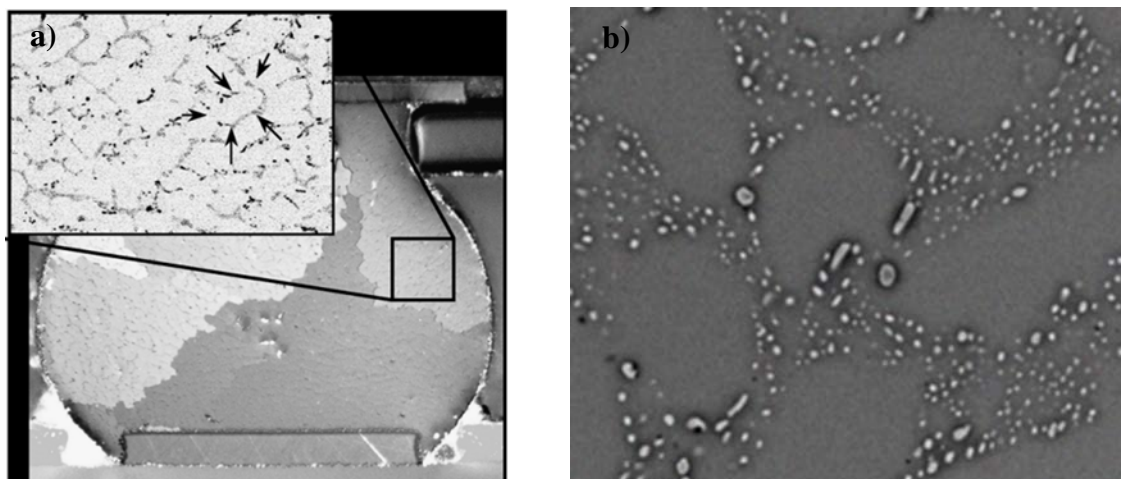
Tällä hetkellä yleisimmät lyijyttömät juotemetallit kaikenlaiseen juottamiseen ovat eutektiset tina-hopea-kupari eli SnAgCu (tai SAC), sekä tina-hopea (SnAg) ja tina-kupari (SnCu) [4]. SnAgCu -juotteita on käytössä useita erilaisia seoksia, kuten Sn-3.0Ag-

0.5Cu (pitoisuudet painoprosentteina), Sn-3.8Ag-0.7Cu ja Sn-4.0Ag-0.6Cu [5]. Juotteella suositetaan eutektista, tai ainakin lähes eutektista koostumusta, jossa koko juotesula jähmettyy samanaikaisesti eutektisessa pisteessä. Tällöin SnAgCu –juotteella on alhaisin sulamislämpötila. Tinapohjaisten lyijyttömien juotteiden suosio johtuu niiden hyvästä yhteensopivuudesta muihin elektroniikkakokoonpanoissa käytettyihin materiaaleihin, sekä parhaiten tyypillisiin elektroniikan valmistusprosesseihin sopivasta sulamispisteestä (232 °C). Sulamislämpötila saadaan tästä alemmas lisäämällä tinaan pieniä määriä hopeaa ja kuparia [6].

Tinaan lisätty hopea myös lujittaa juotetta parantaen siten virumisen kestoa [7]. Kuparin juotteeseen lisäämisen merkittävin vaikutus puolestaan on kuparimetalloinnin liukenemisen vähentäminen, sillä kontaktialueiden liukeneminen sulaan juotteeseen on vakava prosessointiongelma elektroniikkateollisuudessa. Tinalla on suuri reaktioherkkyys kuparin kanssa, joten lähes kokonaan tinasta koostuvat juotteet voivat liuottaa ohuet kuparijohtimet reflown aikana metallienvälisiksi yhdisteiksi. Tinapohjaisten juotteiden vaatima korkea juotoslämpötila nopeuttaa reaktiota entisestään. [8] Liitoksesta tulee tällöin hauras ja murtumille altis, ja koko liitos saattaa irrota [9]. Jo 0,5 painoprosentin kuparin lisäämisen on havaittu hidastavan liukenemistä huomattavasti, sillä juotteessa oleva kupari vähentää konsentraatiogradienttia kuparimetalloinnin ja sulan juotteen välillä. Optimaalisin kuparimäärä olisi 1,54 painoprosenttia, mutta niin korkea kuparikonsentraatio saattaisi haitata juotteen kostuttavuutta. [8]

SnAgCu –juoteliitoksen valmistuksen jälkeinen mikrorakenne koostuu tyypillisesti vain muutamasta suuresta tinakoloniasta, jotka muodostuvat samaan suuntaan kasvaneista kiteistä. Koloniat erottuvat toisistaan suuren kulman rajoilla – orientaatioero vierekkäisten kiteiden välillä on tällöin vähintään 15°. Kolonioiden raerajoilla rakenne poikkeaa niiden sisäosien vastaavasta ja on epäsäännöllisempi. Pitkän matkan yhtenäisen rakenteen puuttumisen takia raerajat ovat mekaanisesti pehmeämpiä, joten mekaanisessa rasituksessa raerajoille ydintyy helpommin aukkoja, jotka voivat edetä säröiksi. Näin ollen SnAgCu –juotteen jähmettymisrakenne, jossa on vain muutamia kolonioita, on hyvä vastustamaan säröjen ydintymistä ja etenemistä. [10]

Kolonian kiteiden välillä puolestaan on 1 – 5°:n pienen kulman eroja, jotka rajaavat rakenteesta niin sanottuja sellejä. Näiden primaaristen Sn sellien väleihin on erkaantunut reflown aikana muodostuneita pieniä Cu₆Sn₅ ja Ag₃Sn –faaseja. [10] Nämä erkaumat sellien välillä lujittavat juotetta. Pienet Ag₃Sn –partikkelit ovat erityisen hyviä hopean lujittavan vaikutuksen ansiosta. Kuvassa 1 a) on esitetty esimerkkinä SnAgCu –juotteella tehdyn BGA –liitoksen (*ball grid array*) jähmettymisrakenne, jossa koloniat näkyvät erisävyisinä alueina. Yhdestä koloniasta on otettu suurennos, jossa näkyy liitoksen sellimäinen rakenne – yksi selli on korostettu nuolilla. [11] Kuvassa 1 b) puolestaan esitetään lähemmin sellien ympäristön rakenne: suurten primaaristen tinasellien ympärille on muodostunut metallienvälisiä yhdistefaaseja Cu₆Sn₅ ja Ag₃Sn [12].



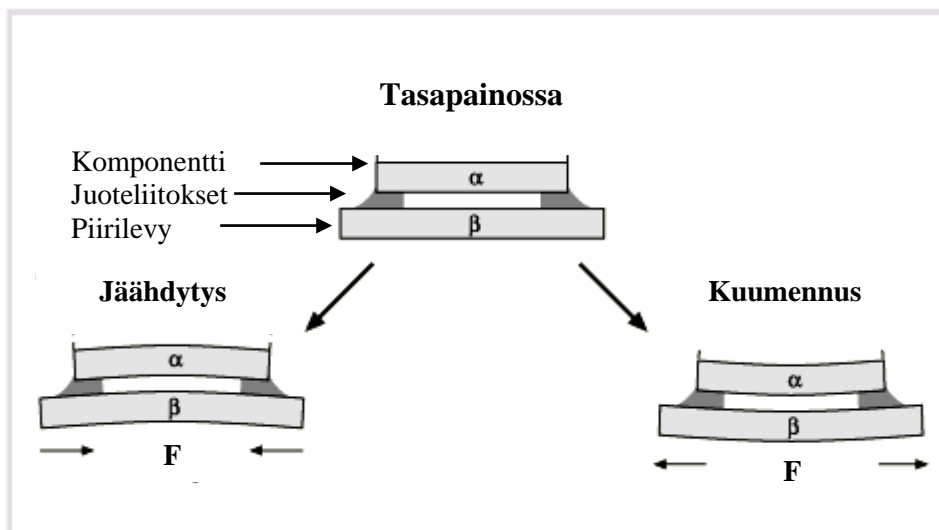
Kuva 1: a) BGA-juoteliitoksen jähmettymisrakenne optisella mikroskoopilla polarisoidua valoa käyttäen. Koloniat näkyvät erivärisinä alueina ja suurennoksessa yhden sellin rajat on korostettu nuolilla. [11] b) Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva tyypillisestä SnAgCu-juotteen mikrorakenteesta, jossa primaarisia tinasellejä ympäröi pienet hajaantuneet Cu_6Sn_5 ja Ag_3Sn faasit [12].

2.2.2 Luotettavuusongelmat

Juoteliitosten luotettavuus on erittäin keskeistä laitteille – yksittäisenkin juotenystyn yhteyden katkeaminen sirun ja piirilevyn välillä voi aiheuttaa jonkin toiminnon menettämisen tai jopa koko laitteen vikaantumisen. Juoteliitosten keskeisimmät luotettavuusongelmat ovat niihin kohdistuvat termomekaaniset rasitukset, iskumaiset kuormitukset, elektro- ja termomigraatio, tinaviikset (*Sn whiskers*) sekä metallienvälisten yhdistekerrosten irtaantuminen rajapinnasta (*spalling*) [4]. Tinaviikset eivät kuitenkaan ole tämän työn kannalta keskeisiä, joten niiden käsittely jätetään kokonaan pois. Metallienvälisten yhdistekerrosten käyttäytymiseen puolestaan palataan elektromigraation yhteydessä kappaleessa 3.2.3.

Valmistuksen ja käytön aikana lähes kaikki elektroniikkalaitteet käyvät läpi useita lämpösyklejä. Lämpösyklaustestit ovatkin yksi nykyisen elektroniikkateollisuuden standardimenetelmistä komponenttien liitosten luotettavuuden arvioinnissa [13]. Lämpötilan muutokset aiheuttavat materiaaleissa lämpölaajenemista, jonka suuruus lämpöyksikköä kohden on useimmille elektroniikassa käytetyille materiaaleille vakio. Tämä vakio on lämpölaajenemisen kerroin eli CTE (*coefficient of thermal expansion*). Elektroniikkakokoonpanoissa on koottu yhteen monia materiaaleja joilla on eri CTE. Lämpötilan muuttuessa materiaalit eivät kuitenkaan voi laajeta vapaasti, koska niitä rajoittavat kokoonpanon muut osat. Yhteensopimattomuus aiheuttaa systeemiin huomattavia leikkauks-, veto- ja puristusjännityksiä, kuten kuvassa 2 havainnollistetaan. Jännitykset aiheuttavat juoteliitosten muokkautumista, koska juoteliitosten lujuus on alhainen verrattuna komponentti ja piirilevymateriaaleihin. Muokkautuminen on aluksi elastista eli palautuvaa. Jos jännitykset ylittävät materiaalin elastiset rajat, seuraa plastista eli palautumattomaa muokkautumista. Koska juotemetalleilla käyttölämpötilat ovat suhteellisen lähellä

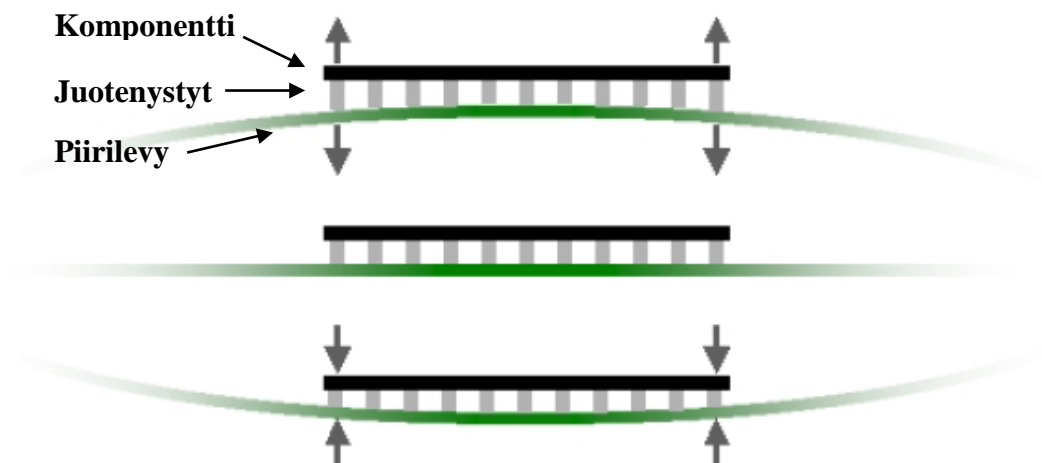
niiden sulamislämpötilaa, niiden virumismuokkautuminen on huomattavaa. Virumismuokkautumisella tarkoitetaan vakiokuormituksessa tapahtuvaa ajasta ja lämpötilasta riippuvaa plastista muodonmuutosta. Lämpösyklitestistä ja sen aiheuttamista rasituksista kerrotaan lisää kappaleessa 2.2.



Kuva 2: Pintaliitettyihin komponentteihin aiheutuu jännityksiä lämpölaajenemisen kerrointen erojen takia. Kuvassa komponentin CTE on pienempi kuin piirilevyn.

Toinen juoteliitosten luotettavuusongelma on niihin kohdistuvat mekaaniset rasitukset, joista keskeisimmät ovat iskumaiset kuormitukset sekä värinä. Kannettavat laitteet voivat käytön aikana usein pudota, ja pudotuksen isku saattaa aiheuttaa esimerkiksi juoteliitokseen murtuman. Tämä on nykyään merkittävin vikaantumismekanismi kannettavissa elektroniikkalaitteissa. Värinälle puolestaan altistuvat muun muassa lentoelektroniikka, auton komponentit ja tietoliikennetekniikan laitteet.

Mekaaninen iskurasitus voi vaurioittaa sekä laitteen ulkoisia osia että aiheuttaa vikoja sen sisäisiin piirilevyihin ja komponentteihin. Syynä piirilevytason vikoihin on ensisijaisesti tuotteen putoamisen aiheuttaman kiihtyvyyden aikaansaama piirilevyn liiallinen taipuminen. Putoamisen isku saa piirilevyn värähtelemään, jolloin se taipuu ylös ja alas useita kertoja ennen liikkeen vaimenemista, kuten kuvassa 3 havainnollistetaan. Taipumisessa levyn ja siihen kiinnitetyn komponentin välillä tapahtuu liikettä, jonka tuloksena voi olla komponentin, johdinten, juoteliitosten tai levyn vaurioituminen. Samoin kuin termomekaanisia rasituksia vastaan, juoteliitoksia pyritään vahvistamaan kestävämmän iskumaisia rasituksia täyttämällä liitosalueen raot epoksilla, mutta esimerkiksi BGA:n juoteliitoksille näin ei voida tehdä. BGA:ssa oleva tyypillinen juotepallo on suuri, 760 μm , ja ilman mitään ulkopuolista vahvistusta juotepallon oma paino itsessään aiheuttaa alustansa huomattavan voiman iskun aikana. Iskumurtumista kerrotaan tarkemmin pudotustestin yhteydessä kappaleessa 2.4.



Kuva 3: Testikokoonpanon kokemat rasitukset piirilevyn taipuessa ylös ja alas.

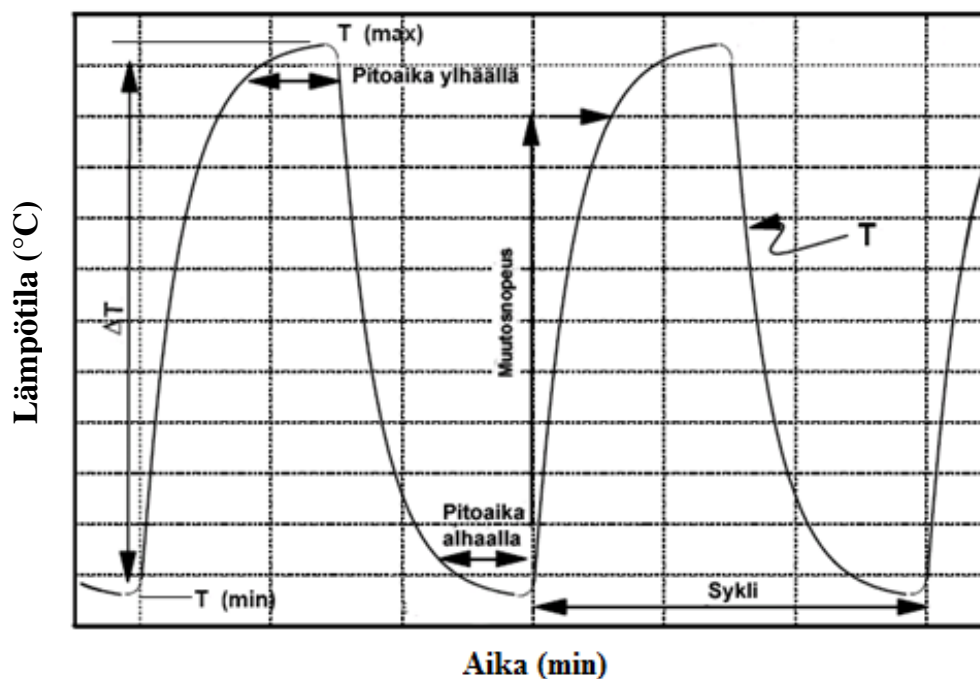
Tärinä puolestaan saa piirilevyn värähtelemään ylös ja alas samoin kuin pudotustestissä. Täräytöksessä kuitenkin levyn taipuman amplitudi pysyy vakiona, kun pudotustestissä se vaimenee pudotusiskun jälkeen. Lisäksi pistetaajuudella tehtävässä täräytöksessä levyn taipumiseen vaikuttaa ainoastaan yksi taipumismoodi pudotustestin useiden moodien summan sijaan, jolloin taipuminen on yksinkertaisempaa ja jännitysten analysointi helpompaa. Täräytystä onkin tutkittu mahdolliseksi nopeammaksi iskumaisen kuormituksen testimenetelmäksi korvaamaan pudotustestit [14, 15]. Täräytystesteistä kerrotaan kappaleessa 2.5.

Kolmas keskeinen luotettavuusongelma, elektromigraatio, on elektronivuon aikaansaamaa metalli-ionien liikettä johtimissa. Liikkeen seurauksena atomeja siirtyy anodi-puolelle ja vastaavasti vakansseja katodipuolelle. Tämä voi johtaa kumpujen ja aukkojen muodostumiseen, jotka puolestaan pahimmillaan aiheuttavat rakenteeseen oikosulun tai avoimen piirin. Juoteliitoksissa elektromigraatio myös kiihdyttää metallien välisten yhdistekerrosten kasvua sekä alusmetalloinnin liukenemistä. Elektromigraatio on merkittävää sovelluksissa, joissa käytetään korkeita virrantiheyksiä. [4] Termomigraatio puolestaan aiheuttaa samankaltaista ionien siirtymistä kuin elektromigraatio, mutta siinä ioneja ajavana voimana on lämpötilagradientti [16]. Elektromigraatioon tutustutaan laajemmin kappaleessa 3.

2.2 Lämpösyklus

Lämpösyklitestit tehdään tyypillisesti yksikammioisissa uunissa. Siinä testikappale laitetaan stationaariseen kammioon, joka vuoroin kuumennetaan ja jäähdytetään tuomalla sisään kuumaa tai kylmää ilmaa. Kaksikammioisissa uunissa testikappale laitetaan liikkuvalla alustalle, joka kulkee tietyssä lämpötilassa pidettävien kammioiden välillä. Suu-

rin haittapuoli useampikammioisissa uunissa on kontrollin puute termisen kuormituksen profiilissa siirrettäessä testikappaletta kammioista toiseen. Kammiot kuitenkin mahdollistavat nopean lämpötilanmuutoksen. Lämpötilan muutostavasta riippumatta testikappaleen kokema lämpötilaa syklataan tietyllä muutosnopeudella valitun maksimi ja minimiarvon välillä muutamasta sadasta muutamaan tuhanteen kertaan. Lämpötila myös pidetään näissä ääriarvoissa ennalta määritellyn ajan. Kuvassa 4 on tyypillinen lämpösyklauksen profiili ja sen määrittämisessä käytettävät parametrit.



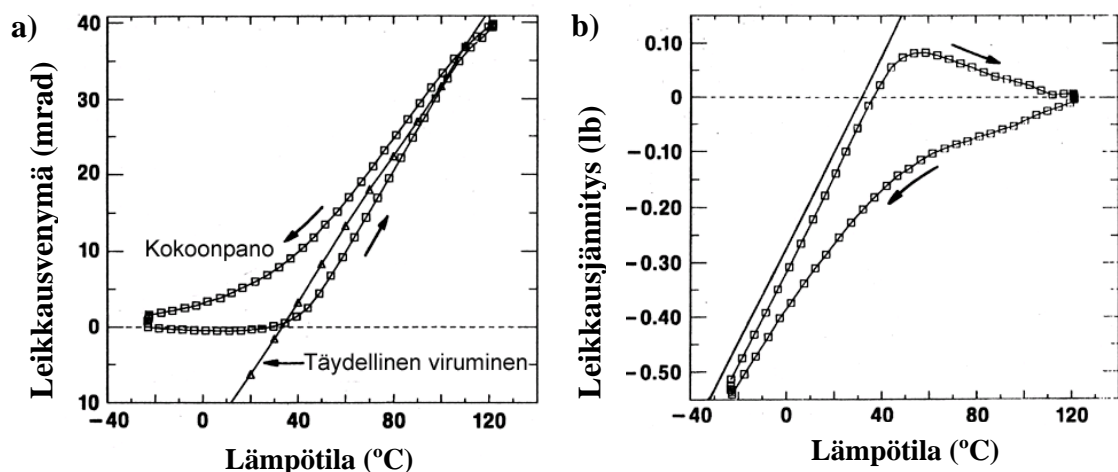
Kuva 4: Lämpösyklaustestin lämpötilaprofiili, sekä testin parametrit [17].

JEDEC:n JESD22-A104D standardi lämpötilan syklaustestille määrittelee maksimi- ja minimilämpötilan käyttöympäristöluokitusten mukaisesti. Eri luokitukset esitellään taulukossa 1, johon on lisätty myös tyypilliset pitoajat sekä syklien lukumäärät tunnissa. Testiolosuhtetta valittaessa tulee huomioida, että maksimilämpötila voi ylittää joidenkin pakkausmateriaalien lasiutumislämpötilan. Tämä voi aiheuttaa näytteeseen vikaantumismekanismeja, joita ei normaalisti nähdä käyttöolosuhteissa. Testissä käytettävä pitoaika valitaan kiinnostuksen kohteena olevan vikaantumismekanismien perusteella, ja lämpötilan muutosnopeus näytteen termisen massan mukaan. Tyypillinen juoteliitoksen väsymisvaurion arvioinnissa käytettävä syklausnopeus on 1-2 sykliä tunnissa. Jos näytteellä on suuri terminen massa ja alhainen lämmönsiirron tehokkuus, tarvitaan riittävän hidas lämpötilan muutosnopeus, tyypillisesti 15 astetta minuutissa tai vähemmän. Tämä saavutetaan parhaiten yhden kammion uuneilla. Näytteille, joilla ei ole termisen massan rajoitusta, suositeltava muutosnopeus on 10–14 astetta minuutissa ja kaksikammioista uunia voidaan käyttää. Profiilin lämpötilanmuutosnopeus mitataan 10 % ja 90 % väliltä kokonaislämpötilanmuutoksesta. [17]

Taulukko 1: Lämpösyklaustestin käyttöympäristöluokitukset [17].

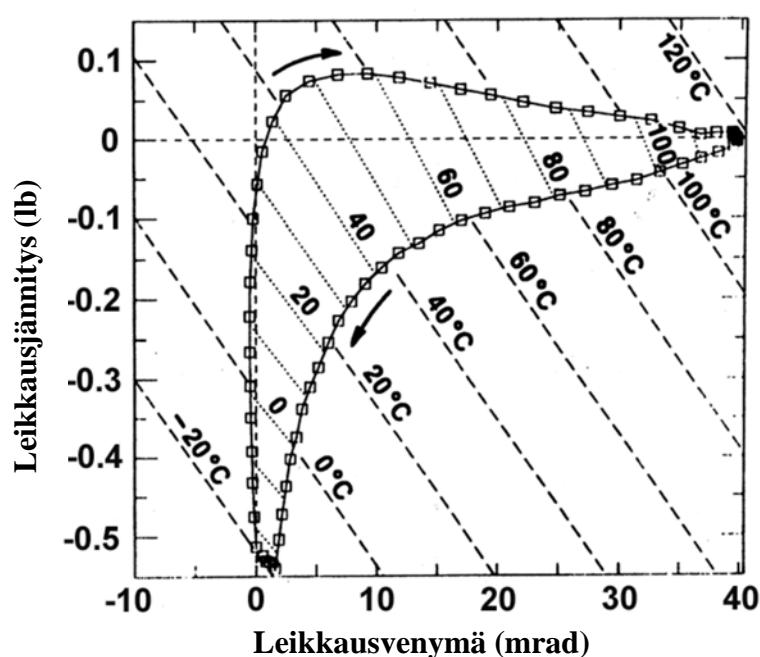
Käyttöympäristöluokitus	Min. lämpötila (°C)	Max. lämpötila (°C)	Tyypillinen syklien lkm tunnissa	Tyypillinen pitoaika (min)
A	-55	+85	2 – 3	1, 5 tai 10
B	-55	+125	2 – 3	1 tai 5
C	-65	+150	2	1 tai 5
G	-40	+125	1 – 2	1, 5, 10 tai 15
H	-55	+150	2	1 tai 5
I	-40	+115	1 – 2	1, 5, 10 tai 15
J	-0	+100	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
K	-0	+125	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
L	-55	+110	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
M	-40	+150	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
N	-40	+85	1 – 3	1, 5 tai 10

Kuvassa 5 esitetään tyypillinen juoteliitoksen sykklauksen aikana kokema leikkausvenymä sekä -jännitys lämpötilan muuttuessa. Kuvaajien tulokset ovat SnPb juotteen lämpösyklauksesta -25 °C:n ja 125 °C:n välillä, jossa pitoajat olivat 2h ja lämpötilanmuutosnopeus 0,5 °C/min. [18] Kun lämpötilaa aletaan nostaa pienimmästä arvosta, liitosrakenneeseen kohdistuu materiaalien lämpötilakertoimien eroista johtuva leikkausjännitys. Kuvassa 5 a) nähdään plastisen venymän olevan olematonta syklin alussa matalassa lämpötilassa, mutta noin +40 °C:n kohdalla käyrä lähtee kasvuun: saavutetaan elastisen venymän raja, jonka jälkeen muokkautuminen on palautumatonta. Kuvassa 5 b) esitetään venymää vastaava leikkausjännitys, jonka nollassa on merkitty katkoviivalla: sen yläpuolella jännitys on vetojännitystä ja alapuolella puristusjännitystä.



Kuva 5: Juoteliitoksen kokemat rasitukset lämpösyklauksessa: a) leikkausvenymä lämpötilan funktiona, b) leikkausjännitys lämpötilan funktiona [18].

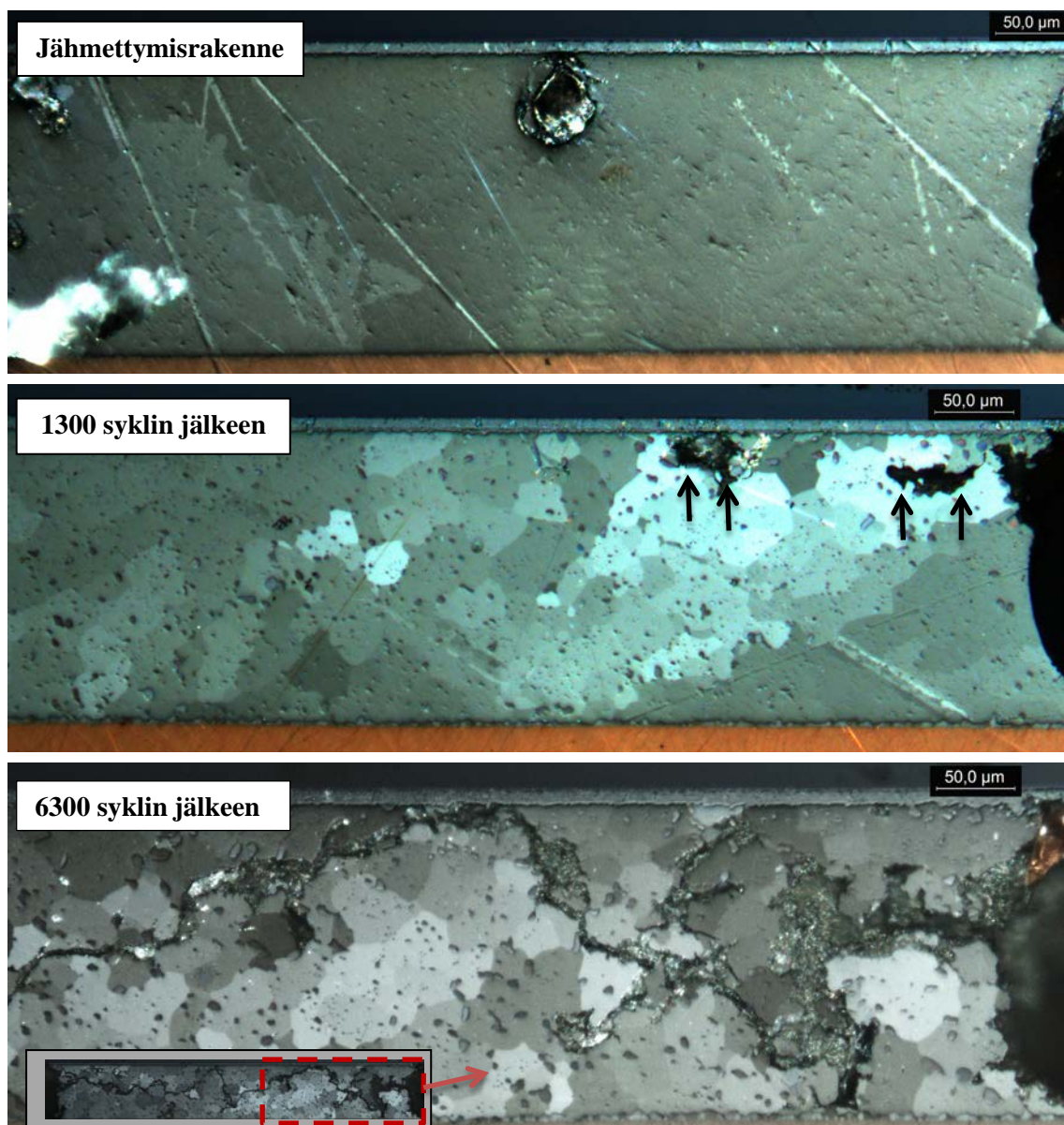
Kun lämpötilaa aletaan nostaa minimiarvosta jännitys kasvaa nopeasti, kunnes noin +40 °C:n jälkeen siirrytään plastisen muodonmuutoksen alueelle. Plastinen muodonmuutos ei enää kasvata liitoksen jännitystä suuremmaksi vaan se laskee, vaikka kuvaan 5 a) vertaamalla nähdään että venymä kasvaa edelleen. Tämä johtuu korotetussa lämpötilassa tapahtuvasta juotteen virumisesta. Kun lämpötila nostetaan huippulämpötilaan ja liitosta pidetään siinä, juoteliitoksessa tapahtuu edelleen virumista, joka laukaisee liitoksen jännitystä muuttamalla elastista venymää plastiseksi. Kun lämpötilaa aletaan ylhäällä pidon jälkeen laskea 125 °C:sta, leikkausvenymä ja -jännitys pienenevät kohti alkutilannetta, mutta eri reittiä; juotteessa on tapahtunut plastista muodonmuutosta. Kuvassa 6 on kuvista 5 a) ja b) koottu kuvaaja leikkausjännityksestä leikkausvenymän funktiona. Katkoviiivoilla merkityt isotermit on määriteltä laskennallisesti, pisteillä merkityt sen sijaan ovat mitattuja arvoja [19].



Kuva 6: Leikkausjännitys leikkausvenymän funktiona [19].

Plastisessa muodonmuutoksessa liitokseen kohdistunut plastinen työ varastoituu materiaalin rakenteeseen energiaksi, jonka määrä on verrannollinen kuvan 6 käyrän sisälle jäävään pinta-alaan. Rasituksen ollessa riittävän suurta, ei kaikki kertynyt energia ehdi purkautumaan toipumalla. Jokaisessa lämpösyklissä energiaa kertyy vähän lisää, kunnes tietyn juotteen keston ylittyttyä energia purkautuu uudelleenkiteytymisellä. Tällöin alkuperäinen jähmettymisrakenne korvautuu uudella hienojakoisemmalla kiderakenteella. Uudelleenkiteytyneessä rakenteessa on enemmän säröjen ydintymisen ja etenemisen mahdollistavia raerajoja, joilla myös sijaitsee rakennetta heikentäviä epäpuhtaus- ja seosatomia sekä jähmettymisessä muodostuneita sekundaarisia faaseja. Juoteliitoksen väsyminen termomekaanisessa rasituksessa johtuu tästä paikallisesta uudelleenkiteytymisestä suurimpien rasituksien alueilla. Kuvassa 7 on esitetty SnAgCu -juotteen mikrora-

kenteen muuttuminen lämpösyklauksessa polarisoitua valoa käyttäen. Kuvat ovat tämän työn testeistä. Ylimmässä kuvassa on juotteen jäähmettymisrakenne, ja alemmissa kuvissa juote 1300 ja 6300 syklin jälkeen lämpösyklauksessa -40 °C:n ja $+125\text{ °C:n}$ välillä. Pitoajat olivat 30 minuuttia ja muutos aika ääriämpötilojen välillä 21 minuuttia. Kuvista nähdään, kuinka 1300 syklin jälkeen osa juotteesta on uudelleen kiteytynyt ja liitoksen reunassa on pieni särö. Liitoksen vikaantuessa 6300 syklin jälkeen liitos on kauttaaltaan uudelleen kiteytynyt ja murtuma kulkee liitoksen läpi uudelleen kiteytyneiden alueiden raerajoja pitkin.

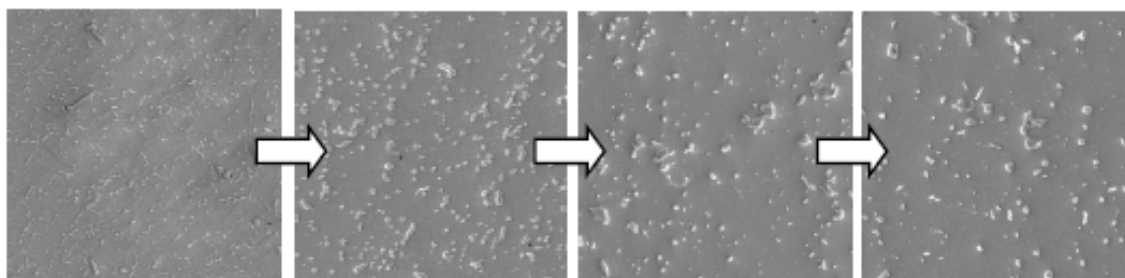


Kuva 7: Lämpösyklauksen aikana juoteliitoksen mikrorakenne muuttuu asteittain uudelleen kiteytymisen myötä. Kuvissa juoteliitos esitetään mikroskoopin polarisoitua kirkaskenttävaloa käyttäen.

2.3 Isoterminen hehkutus

Pitotestauksessa eli hehkutuksessa lämpötila pidetään vakiona ja korkeampana kuin komponenttien normaali käyttölämpötila. Esimerkiksi JEDEC:n JESD22-A103D standardi säilytykselle korkeassa lämpötilassa määrittelee testilämpötilan 125 – 300 °C välille [20]. Testausajat ovat hehkutuksessa tyypillisesti pitkiä, koska vakiolämpötila ei rasita materiaaleja mekaanisesti vaan heikentää niitä ajan kuluessa.

Isoterminen hehkutus muuttaa huomattavasti juotemetallien mikrorakennetta. Kuten aiemmin kerrottiin, tyypillinen SnAgCu -juotteen mikrorakenne koostuu Sn matriisista ja Ag_3Sn sekä Cu_6Sn_5 -faaseista. Isotermisessä vanhennuksessa tinasellit kasvavat suuremmiksi, ja sekundaarifaasit kehittyvät diffuusion vaikutuksesta yhä suuremmiksi neulamaisiksi partikkeleiksi. Tämä mikrorakenteen karkeutuminen on sitä nopeampaa mitä korkeampi lämpötila ja pidempi altistus aika ovat. [5] Kuvasta 8 näkyy mikrorakenteen asteittainen karkeutumisen isotermisessä vanhennuksessa. Karkeutuminen aiheuttaa muutoksia juotemetallin mekaniisiin ominaisuuksiin, sillä sekundaarifaasin partikkelien kasvaessa suuremmiksi niiden kyky estää dislokaatioiden liikettä ja rearajojen liukumista alenee huomattavasti [7]. Virumisen päädeformaatiomekanismi juotteille liittyy pääosin dislokaatioiden liikkumiseen, joten karkeutuminen johtaa materiaalin vahvuuden alenemiseen ja virumisdeformaation helpottumiseen [5, 7].



Kuva 8: SnAgCu -juotteen mikrorakenteen asteittainen karkeutuminen isotermisessä hehkutuksessa. Kuvassa SAC105 -juote 125 °C lämpötilassa. [7]

2.4 Pudotustesti

Putoamisen aiheuttamaa räsitusta voidaan simuloida pudotustesteillä, joilla tutkitaan elektroniikkakomponenttien kestävyyttä ja arvioidaan niiden elinikää iskumaisessa kuormituksessa. Levytason pudotustestimenetelmällä arvioidaan ja vertaillaan kannettavien elektroniikkalaitteiden pintakiinnitettyjen elektroniikkakomponenttien pudotuskestävyyttä olosuhteissa, joissa piirilevyn liiallinen taipuminen aiheuttaa tuotteen vikaantumisen. Tutkittavat komponenttilevyt kiinnitetään testissä tavallisesti pudotuskelkkaan, joka päästetään putoamaan vapaasti. Näin aiheutetaan komponenttilevyille haluttu kiihtyvyys, jonka suuruus määräytyy pudotuskelkan massan ja pudotuskorkeuden perusteella. Kiihtyvyyttä mitataan kelkkaan kiinnitettävällä kiihtyvyyssanturilla.

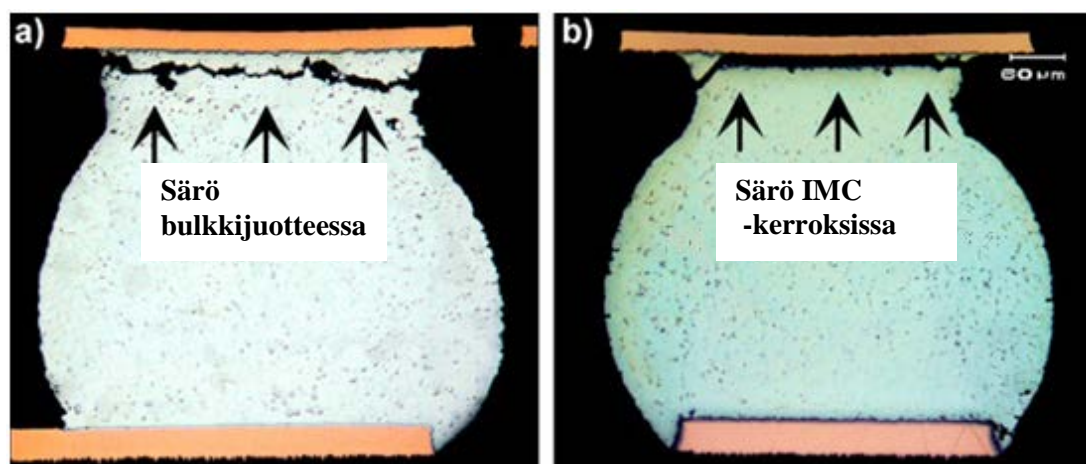
Yksi laajalti käytetty [21, 22] standardi tällaisille levytason pudotustesteille on JEDEC:n JESD22-B111 [23]. Standardin tarkoitus on vakioida tarkasti testilevy ja testin menettelytavat, jotta testit olisivat toistettavia ja niiden tulokset keskenään vertailukel-

poisia. Standardi määrittää testissä käytettäväksi ympäristöluokan B, jossa iskupulssi on puolen millisekunnin puolisinipulssi ja sen kiihtyvyyksmaksimi on 1500 G. JEDEC:n eri standardiolosuhteet piirilevyjen iskupulsseille esitetään taulukossa 2. Olosuhde B:n lisäksi testissä voidaan käyttää muitakin ympäristöluokkia. [23] Taulukossa annetut pudotuskorkeudet ovat vain suuntaa antavia – todelliset korkeudet tulee määrittää kiihtyvyysspulssin mukaan oikeiksi. Komponenttien vaurioitumista seurataan mittaamalla resistanssia niin sanotulla ketjutusverkolla eli sarjakytkennällä, jossa komponentin jokainen nysty on ketjutettu vuoroin komponentin ja vuoroin piirilevyn puolelta. Siten yhdenkin nystyn murtuminen voidaan havaita.

Taulukko 2: Standardin JESD22-B104C vaatimukset eri ympäristöluokissa [24].

Käyttöympäristöluokitus	H	G	B	F	A	E	D	C
Huippukiihtyvyys (G)	2900	2000	1500	900	500	340	200	100
Pulssin pituus (ms)	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	2.0
Pudotuskorkeus (cm)	150	130	112	76.2	50.8	33.0	17.8	7.62
Nopeuden muutos (cm/s)	543	505	467	386	316	254	187	122

Pudotuksen mekaanisen iskun aiheuttama juoteliitoksen vikaantuminen on mekani-
nismiltaan erilainen kuin mitä lämpösyklauksessa havaitaan. Kuvassa 9 verrataan läm-
pösyklauksessa ja mekaanisessa iskukuormituksessa havaittua juoteliitoksen tyypillistä
vikaantumista. Kuvassa 9 a) lämpösyklauksen aiheuttama särö kulkee bulkkijuotteessa
raerajoja pitkin, kun kuvassa 9 b) mekaanisen iskun aikaansaama särö etenee metallien-
välisissä yhdistekerroksissa. [25]



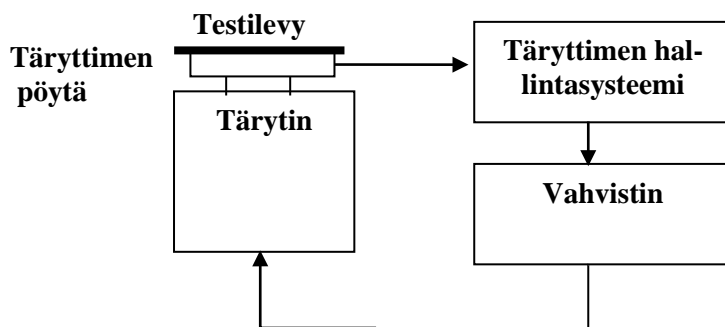
Kuva 9: Juoteliitoksen vikaantuminen a) lämpösyklauksessa ja b) mekaanisessa isku-
kuormituksessa [25].

Pudotustestit tehdään tavallisesti huoneen lämpötilassa, mikä on suhteellisen korkea
verrattuna juotteen sulamispisteeseen (0.6Tm Kelvineinä). Näin korkeassa lämpötilassa

juotteen mekaaninen käyttäytyminen riippuu voimakkaasti muodonmuutosnopeudesta (*strain rate*). Pudotustestin nopeassa iskukuormituksessa juotteen muodonmuutosnopeus on huomattavasti suurempi kuin lämpösyklauksessa. Korkea muodonmuutosnopeus lujittaa juotetta, jolloin liitosalueen heikoimmaksi rakenteeksi jää metallienvälinen yhdistekerros. Tällöin säröt etenevät bulkkijuotteen sijaan joko juotetta hauraammissa metallienvälisissä yhdistekerroksissa tai juotteen ja IMC-kerrosten rajapinnoilla. [25]

2.5 Tärytys

Tärytystestillä arvioidaan elektroniikkalaitteissa käytettävien komponenttien kykyä sietää vähintään keskitasoista tärinää, joka aiheutuu tuotteen liikkeestä kuljetuksen tai käytön aikana. Nykyaikainen tärytyslaitteisto muodostuu kolmesta päälaitteesta, jotka ovat tärytin, vahvistin ja hallintasysteemi. Virtalähteestä tuleva halutun taajuinen ja amplitudinen sähköinen signaali kulkee vahvistimen kautta täryttimelle. Tärytin muuntaa sähköisen energian edelleen testikappaleeseen kohdistettavaksi tärinäliikkeeksi. Hallintasysteemi, eli tietokone ja signaalilähde, puolestaan tarkkailee tärytystestiä sekä tärytinpöydän kiihtyvyyttä ja antaa sen perusteella vahvistimelle asianmukaisen sisääntulosignaalin. Kuvassa 10 esitetään kaaviokuva tyypillisestä tärytyslaitteistosta.



Kuva 10: Kaaviokuva tyypillisestä tärytyslaitteistosta viitettä [26] mukaillen.

Tärytin voi perustua esimerkiksi polttomoottoreihin, hydraulisiin, pneumaattisiin tai sähködynaamisiin moottoreihin. Yleisimmin käytetty on elektrodynaaminen tärytin. Sen toiminta perustuu kahteen keskenään vuorovaikutuksessa olevaan magneettikenttään. Toinen kentistä on staattinen, ja se muodostetaan täryttimen rungossa olevalla kestopälmagneetilla. Toinen kenttä puolestaan on verrannollinen laitteeseen lisättävään jännitteeseen, ja se saadaan aikaan magneettisydänkäämillä. Magneettisydän on yhdistetty täryttimen pöytään, johon testikappale on kiinnitetty. [27]

Elektrodynaamisella tärytyssysteemillä voidaan tehdä erityyppisiä testejä, jotka voidaan luokitella sinimuotoisiin, satunnaisiin ja iskutesteihin. Sinimuotoisissa testissä tutkittavaan testikappaleeseen syötetään signaalia joko yhdellä taajuudella tai pyyhkäistään ennalta määriteltä taajuusaluetta edes takaisin. Taajuusalueen pyyhkäisy on hyödyllinen myös testikappaleen resonanssitaajuuden paikantamisessa. Resonanssi- eli luonnollisella taajuudella saadaan testilevyn taipumiselle suurin poikkeama. Satunnai-

sessä tärytyksessä sen sijaan testikappaleeseen syötetään tietyn taajuusalueen taajuuksia samanaikaisesti. Useimmat täryttimet pystyvät myös tekemään iskutestejä, joissa magneettisydämelle annetaan vain alkupoikkeama, jonka synnyttämän energiapulssin vahvistin syöttää testikappaleeseen tietyllä aaltomuodolla. [26]

JESD22-B103B standardi määrittelee tärytystestin, jossa pyyhkäistään käyttöympäristön mukaan määräytyvää taajuuskaistaa. Testikappaletta tärytetään yksinkertaisella harmonisella siniaaltoilikkeellä tietyllä huippukiihtyvyydellä. Eri käyttöympäristöluokitusten arvot esitetään taulukossa 3. Testin huippukiihtyvyyden tai poikkeaman arvoihin sallitaan korkeintaan $\pm 10\%$ ero taulukon määrittelemiin. Täysi taajuuskaistan pyyhkäisy pienimmästä suurimpaan taajuuteen ja takaisin tulee tehdä logaritmisesti neljässä minuutissa. Pyyhkäisynopeuden tulee olla dekadi minuutissa, eli minuutin aikana taajuus kymmenkertaistuu senhetkisestä arvostaan. Kukin suunta (X, Y ja Z) pyyhkäistään testin aikana neljä kertaa. Testistä saa kuitenkin jättää pois sellaiset taajuudet, joilla esiintyy kontrolloimattomia resonansseja kiinnityskohdissa, tai joilla ei ole merkittävää vaikutusta jännitysten synnyssä. Tällaiset poikkeukset tulee kuitenkin dokumentoida tarkasti. Tärytystestissä komponentti todetaan rikkoutuneeksi, jos sen hermeetisyysvaatimukset eivät täyty, määritellyt parametrien rajat ylitetään tai jos sen toimintaa ei voida todeta määritellyissä olosuhteissa. [28]

Taulukko 3: JESD22-B103B standardin vaatimukset sinimuotoisen taajuuspyyhkäisyn arvoille luokituksittain [28].

Käyttöympäristöluokitus	Huippukiihtyvyys (G)	Poikkeama (mm)	Pyyhkäisykaistan leveys (Hz)	Min. / Max. Taajuus (Hz)
1	20	1.5	80	20 / 2000
2	10	1.0	70	10 / 1000
3	3	0.75	45	5 / 500
4	1	0.5	31	5 / 500
5	0.3	0.25	24	5 / 500
6	0.1	0.125	20	5 / 500
7	0.01	0.039	14	5 / 500
8	0.001	0.0127	6.2	5 / 500

2.6 DC-virtarasitus

DC-virtarasituksessa testikomponenttien läpi syötetään joko vakiosuuruisena pysyvää tai jaksoittaista sähkövirtaa. Jaksottaista tehon syöttöä käytetään tehosyklauksessa, jossa liitos altistetaan sykleittäin sekä sähkövirralle että lämpösyklauksen kaltaisesti vaihtuvalle lämpötilalle. Vakiosuuruisena pysyvää virtasyöttöä käytettäessä sen sijaan lämpötila pysyy vakiona.

Voimakas sähkövirta aiheuttaa juotemateriaalissa elektromigraatiota, joka pahimmillaan voi aiheuttaa rakenteeseen oikosulun tai avoimen piirin. Elektromigraatio myös kiihdyttää metallienvälisten yhdistekerrosten kasvua sekä alusmetallonnin liukenemista juotteeseen. Virtarasituksen on lisäksi havaittu nopeuttavan juotteen vikaantumista vir-

ran ahtautumisen takia. Korkeille virrantiheyksille altistuvien liitosten suorituskyvyn arviointiin on kehitetty useita standardeja [29-31]. Elektromigraation vaikutuksiin juotelitoksissa tutustutaan kappaleessa 3.2.

2.7 Yhdistelmätestaus

Elektroniikkalaitteet altistuvat käyttöympäristössään tavallisesti useammalle eri rasitukselle. Esimerkiksi autojen ja lentokoneiden elektroniikkaan vaikuttaa jatkuvasti sekä värinä että lämpötilojen vaihtelut. Perinteisiä yksiparametrisia eli yhden rasitustavan testejä paremmin todellisia käyttöolosuhteita vastaavat yhdistelmätestit, joissa yhdistetään samaan testiin useampi kuormituspa, kuten lämpösyklaaminen ja tärytys. Paremman vastaavuuden lisäksi menetelmä nopeuttaa testikappaleen vikaantumista, jolloin saavutetaan nopeampi sekä edullisempi luotettavuustesti. Yhdistelmätestissä eri kuormitukset voidaan yhdistää joko peräkkäin tai rinnakkain. Peräkkäisessä kuormituksessa käytetään vain yhtä rasitusta kerrallaan ja ne lisätään peräkkäin tai vuorotellen, kun rinnakkaisessa testauksessa kuormitukset kohdistetaan testikappaleeseen samanaikaisesti.

Eduistaan huolimatta yhdistelmätestejä ei ole otettu laajalti käyttöön elektroniikkateollisuudessa, koska ne ovat huomattavasti monimutkaisempia kuin perinteiset paljon tutkitut yhden parametrin testit. Yhdistelmätestien aikaan saamien vikaantumisten mekanismit eivät tavallisesti ole kovin selkeät, eikä yhdistettyjen kuormien välisistä vuorovaikutuksista ole päästy yksimielisyyteen. Lisäksi edullisin testiparametrien valinta- ja määrittelytapa on usein epäselvä, samoin kuinka yleistää testitulokset todelliseen käyttöympäristöön. Oman vaikeutensa tuovat vielä eri kuormitusten taajuudet ja amplitudit, jotka voivat olla huomattavan erilaiset, kuten nopean tärytyksen yhdistäminen hitaaseen lämpösyklaukseen.

Elektroniikan kiihdytetyissä luotettavuustesteissä on käytössä joitakin standardoituja menetelmiä, joita voidaan pitää yhdistelmätesteinä. Esimerkiksi 85/85 - testissä kiihdytetään testikappaleen korroosiota yhdistämällä 85 °C:een isotermiseen lämpötilaan 85 %:n suhteellinen kosteus. Kokoonpanoon voidaan lisäksi kytkeä bias – jännite, jolloin korroosion lisäksi kiihdytetään elektromigraatiota ja dendriittien kasvua eri potentiaalisissa olevien johtimien välillä. Yleisimmin käytetty usean kuormitusparametrin luotettavuuden arviointimenetelmä on HALT (*highly accelerated life testing*). Sen tarkoituksena on kuitenkin vain tunnistaa nopeasti mahdolliset vikaantumistavat, ja sitä käytetään apuna laitteen suunnittelussa parantamaan luotettavuutta. HALT ei ole tarkoitettu todellisten käyttöolojen simulointiin tai laitteen eliniän arviointiin. Menetelmässä testikappaleta kuormitetaan tavallisesti asteittain peräkkäisillä rasituksilla, kuten korotetulla lämpötilalla, tärytyksellä tai korkealla jännitteellä. Yksi rasitusvaihe on usein myös lämpötilan ja tärytyksen samanaikainen yhdistäminen.

Yhdistelmätestauksen tarkoituksena voi myös olla jonkin rasitustavan vaikutuksen tutkiminen jollakin toisella rasitustestillä, tai eri rasitusten vertaaminen toisiinsa. Esimerkiksi isotermisen vanhennuksen vaikutusta juotteen termisen väsymisen kestävyys-teen on testattu pitämällä näytteitä ensin 100 °C:ssa 100, 500 ja 1000 tuntia, jonka jälkeen niitä on lämpösyklattu vikaantumiseen asti [32]. Toinen esimerkki on lämpösyklauksen vaikutuksen tutkiminen juotteen pudotusiskujen kestoon altistamalla näytteitä eri lämpösykliä määrään, jonka jälkeen vikaantuminen on aiheutettu pudotustestillä [33].

Tämän työn kannalta erityisen kiinnostavat yhdistelmätestit ovat isothermisen hehkutuksen ja toisaalta voimakkaan DC-virtarasituksen vaikutus juotteen mekaanisen ja termomekaanisen rasituksen kestoon. Seuraavaksi tutustutaan lyhyesti näihin vaikutuksiin.

Isothermisen vanhennuksen on havaittu alentavan SnAgCu-juotteiden termomekaanisen rasituksen kestoja. Esimerkiksi SnAgCu näytteet, joita vanhennettiin 500 tuntia 125 °C:ssa, vikaantuivat lämpösyklauksessa keskimäärin 25 % nopeammin kuin käsittelemättömät näytteet [34]. Myös juotteen mekaanisen rasituksen keston on todettu selvästi huononevan isothermisen vanhennuksen seurauksena [32]. Useammassa tutkimuksessa isothermisesti esivanhennettujen juoteliitosten on havaittu rikkoutuvan pudotustestissä huomattavasti nopeammin kuin ilman vanhennusta [14, 35]. Tällaisessa yhdistelmätestissä säröt ydintyivät bulkissa, mutta siirtyivät nopeasti etenemään Cu₃Sn-kerroksessa, kuten kuvassa 11 esitetään. Isothermisen hehkutuksen havaittiin aiheuttaneen Cu₃Sn-kerrokseen lukuisia pieniä huokosia, joita pitkin särö pääsi helposti kulkemaan. [25]



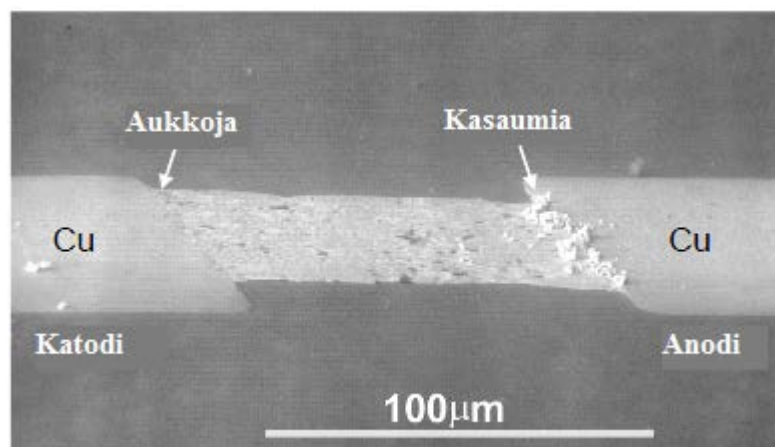
Kuva 11: *Vikaantuminen isothermisen vanhennuksen jälkeen pudotustestissä [25].*

Kuten isoterminen esivanhennus, DC-virtakäsittely heikentää juotteen mekaanisen rasituksen kestoja [35, 36]. Pudotustestissä iskun voima aiheuttaa juoteliitoksen rikkoutumisen katodipuolella, mikä on ennestään heikentyneenä elektromigraation aiheuttamasta aukkojen muodostumisesta. Esimerkiksi eräässä tutkimuksessa näytteitä rasitettiin 144 tuntia 100 °C:een testilämpötilassa joko virrantiheydellä 0 A/cm², 3.3x10³ A/cm² tai 5x10³ A/cm², jonka jälkeen tehtiin pudotustesti iskukiihtyvyydellä 680G vikaantumiseen asti. Näyte vikaantui pudotustestissä sitä nopeammin, mitä suuremmalla virrantiheydellä sitä oli rasitettu. Sähkövirran aiheuttaman metallienvälisten yhdistekerrosten epätasaisen kasvun juotenystyn anodi- ja katodipinnoilla havaittiin heikentävän merkittävästi juoteliitoksen mekaanisia ominaisuuksia, vaikka elektromigraatio ei olisi ollut voimakasta. Siten matalakin virtarasitus saattaa vaikuttaa juotenystyjen luotettavuuteen, jos ne altistuvat samanaikaisesti mekaaniselle iskurasitukselle. [36]

Tehosyklauksessa juoteliitosten pääasiallisen kuormitusmekanismin on nykyisin käytetyillä virrantiheyksillä havaittu olevan termomekaaninen rasitus, joka johtaa SnAgCu –juotteella liitosrakenteen uudelleen kiteytymisen avustamaan murtumiseen raerajoja pitkin [37]. Liitoksen läpi kulkevan sähkövirran on myös havaittu tehosyklauksessa kiihdyttävän sekä juoterakenteen uudelleen kiteytymistä että liitoksen rajapinnoille syntyvien metallienvälisten yhdistekerrosten kasvua. Tämän perustella voisi olettaa vakiosuuruisenakin pidettävän sähkövirran todennäköisesti heikentävän juoteliitoksen luotettavuutta termomekaanisessa rasituksessa.

3 Elektromigraatio

Elektromigraatio on elektronivuon aikaansaamaa metalliatomien siirtymistä johtimissa. Johteessa kulkevat elektronit törmäävät diffusoituviin atomeihin, aiheuttaen siten niiden siirtymisen viereiseen elektronivirran suunnassa olevaan vakanssiin. [16] Näin atomeja kasaantuu johteen anodipuolelle ja vakansseja katodipuolelle. Tämä voi johtaa kumpujen ja aukkojen muodostumiseen, jotka puolestaan pahimmillaan aiheuttavat rakenteesen oikosulun tai avoimen piirin. [4] Kuvassa 12 havainnollistetaan tätä tilannetta.



Kuva 12: Aukkojen ja kasaumien muodostuminen tinajohtimen katodi- ja anodirajapinnalle elektromigraation vaikutuksesta [38].

Elektromigraatioilmiö havaittiin ensimmäisen kerran jo vuonna 1861, mutta sitä ei kyetty selittämään, sillä elektroneja ei ollut vielä löydetty. Vasta viime vuosikymmeninä elektromigraation vaikutus luotettavuusongelmana elektroniikassa on huomioitu erityisesti siruilla käytettävissä kapeissa alumiini- ja kuparimetallolinnoissa, joissa virrantiheydet nousevat korkeiksi. [39] Elektroniikkapiirien jatkuva integroituminen laajemmiksi kokonaisuuksiksi yhä pienempiin kokoonpanoihin aiheuttaa piirilevyjohtimien ja komponenttiliitosten lämpötilan sekä virrantiheyden kasvamisen. Tämä on erityisen haastava yhdistelmä luotettavuuden kannalta – kehityssuunnan seurauksena elektromigraatiosta on tullut elektroniikkakokoonpanojen luotettavuusongelma [4, 39, 40]. Tässä osiossa käsitellään ensin elektromigraatioteorian fysikaalisia perusteita kappaleessa 3.1, jonka jälkeen syvennyttään elektromigraatioon juoteliitoksissa kappaleessa 3.2.

3.1 Elektromigraatioteorian perusteet

Tässä kappaleessa tutustutaan elektromigraation perusilmiöihin. Ensin tarkastellaan diffuusiota aineen siirtymisen mekanismina, ja elektronituulta sekä suoraa sähkömagneettista voimaa elektromigraatiota ajavina voimina. Sen jälkeen paneudutaan vielä aineeseen muodostuvan jännitysgradientin elektromigraatiota hillitsevään vaikutukseen sekä virran ahtautumiseen elektromigraation kiihdyttäjänä.

3.1.1 Diffuusio

Elektromigraation ilmenemiseen tarvitaan sekä riittävä lämpötila että virrantiheys. Jos johdemateriaalia pidetään hyvin alhaisessa lämpötilassa, kuten nestetyypen lämpötilassa, elektromigraatiota ei pysty ilmenemään vaikka virrantiheys olisi kuinka suuri; ajava voima ei riitä, vaan tarvitaan myös lämmön aktivoimaa atomien liikkuvuutta ja diffuusiota. [4] Seoksen diffuusiassa ajavana voimana on konsentraatioero. Tasapainotilan materiaalien virtauksessa konsentraatio ei ole ajasta riippuvaa, jolloin pätee Fickin ensimmäinen laki

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (1)$$

jossa J on aineen i vuo (J_i), D sen diffuusiokerroin (cm^2/s) ja $\frac{\partial c}{\partial x}$ konsentraatiogradientti. Fickin lain käyttö kuitenkin edellyttää, että konsentraatiogradientti on ainoa ajava voima. Jos diffuusioon vaikuttaa muitakin ajavia voimia, tulee yhtälöön (1) lisätä niin sanottu kulkeutumistermi:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} + \langle v \rangle c. \quad (2)$$

[41] Kulkeutumisnopeus noudattaa Nernst–Einstein relaatiota

$$v_D = \frac{DF}{k_T}, \quad (3)$$

jossa v_D on massan kulkeutumisnopeus (cm/s), F on ajava voima diffuusiolle (eV/cm), ja k_T on keskimääräinen termien energia atomia kohti. Diffuusiokerroin D puolestaan on lämpötilariippuvainen

$$D = D_0 e^{\frac{-\Delta Q}{k_T}}, \quad (4)$$

jossa D_0 on lämpötilasta riippuva vakio D :n yksiköillä (cm^2/s) ja ΔQ on aktivaatioenergia aktiiviselle diffuusiopolelulle (eV). Juotemetalliyhdisteillä on alhainen sulamislämpötila, ja koska diffuusion aktivaatioenergia seuraa metalleissa niiden sulamispisteitä, juotemetallien diffuusio on suhteellisen nopeaa. [39]

Yhtälöön (3) sisältyy diffuusiokertoimen lisäksi myös diffuusiota ajava voima. Missä tahansa systeemissä massan siirtoa ajava voima muodostuu monista joko yhdessä tai

toisiaan vastaan toimivista osatekijöistä. Yksi näistä osatekijöistä on elektromigraatio. Massan siirtoa ajava voima

$$F = F_{EM} + F_{TM} + F_{\sigma} + F_S, \quad (5)$$

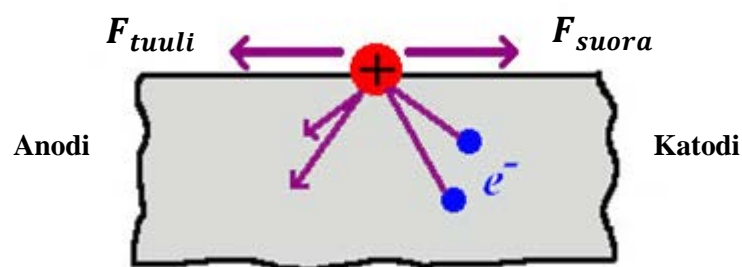
jossa elektromigraatio (EM) on yksi neljästä keskeisimmästä vaikuttajasta ajavaan voimaan. Kolme muuta ovat termiset gradientit (TM), jännitysgradientit (σ) ja kemiallisen potentiaalin gradientit (S). Kuinka nämä ajavat voimat ovat keskenään vuorovaikutuksessa ja miten ne vaikuttavat luotettavuuteen, riippuu lämpötilasta, geometriasta ja metalliyhdisteen koostumuksesta. Esimerkiksi yhden faasin metalleissa yleensä vain elektromigraatio ja jännitysgradientit ovat tärkeitä. Juotteissa voi olla keskeistä myös termisistä gradientteista riippuva termomigraatio. [39]

3.1.2 Elektromigraation ajava voima

Elektromigraatiossa johdinmateriaalin atomit siirtyvät johtimessa kulkevan sähkövirran seurauksena elektronien kulkusuuntaan. Sähkökentässä liikkuvan elektronivuon liikeenergia siirtyy johtimen atomeille suoran sähköstaattisen voiman sekä elektronituulen avulla. Suoralla voimalla tarkoitetaan ulkoisen sähkökentän suoraa vaikutusta migratoivan ionin varaukseen ja elektronituulella johtavien elektronien sirontaa metalliatomista. Elektromigraation ajava voima on suoran sähköstaattisen voiman ja elektronituulen summa,

$$F_{EM} = F_{suora} + F_{tuuli}. \quad (6)$$

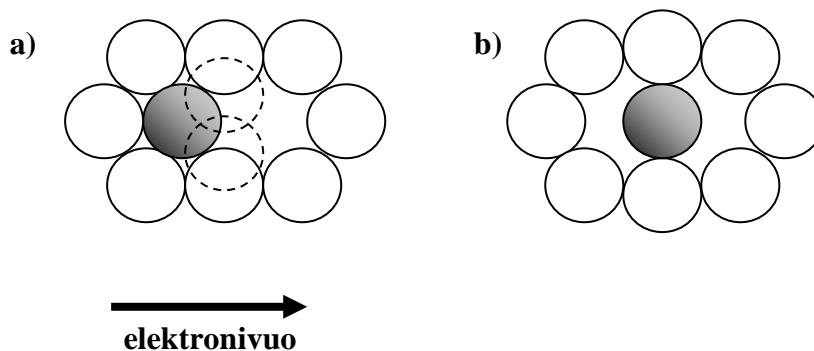
Näiden voimien skemaattinen kuvaus esitetään kuvassa 13. Elektronituulen voima on hyvällä johtimella tavallisesti paljon suurempi kuin suora voima elektromigraatiolle metalleissa [4]. Siten elektromigraatiossa vahvistuva atomidiffuusiovuo on elektronivuon suuntaan.



Kuva 13: Elektromigraatioon vaikuttava ajava voima on suoran sähköstaattisen voiman ja elektronituulen yhteisvaikutus.

Elektronituulella tarkoitetaan elektronien siroamista hilan atomeista. Terminen energia saa hilan atomit värähtelemään, jolloin ne liikkuvat paikoiltaan. Kun metallin vapaat elektronit liikkuvat materiaalin läpi, ne vuorovaikuttavat hilan epätäydellisyyksien

kanssa ja siroavat niistä. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän pois paikoiltaan atomit värähdellessään ovat, ja sitä suurempaa on myös sironta. Sirontaa ilmenee aina kun hilan atomi on pois tasapainoasemastaan mistä tahansa syystä. Kuvassa 14 havainnollistetaan diffusoituvan atomin elektromigraatiota. Siinä on tummalla merkitty diffusoituva Al-atomi ja sen vieressä on vakanssi pintakeskisessä hilarakenteessa. Niillä on neljä yhteistä lähinaapuria, joista kaksi katkoviivoin merkittyä atomia ovat kuvan atomitasoin ala- ja yläpuolella. Kun tummalla merkitty atomi on diffusoitumassa viereiseen vakanssiin puolessa välissä matkaa (kuva 14 b), se on aktivoidussa tilassa satulapisteesä (*saddle point*) samalla kun liikuttaa paikaltaan neljää lähintä naapuriatomia. Satulapiste ei ole osa hilan säännöllisyyttä, joten siinä oleva atomi on pois tasapainotilastaan ja se lisää sähkövirran vastusta paljon enemmän kuin normaali hila-atomi. [4] Diffusoituvan atomin kanssa törmäävät elektronit siirtävät kineettistä energiaansa atomille työntämällä sitä elektronivuon suuntaan tasapainoasemaan eli vakanssipaikkaan. Atomin diffuusio siis vahvistuu elektronituulen suuntaan, ja vastaavasti vakanssit kulkeutuvat vastakkaiseen suuntaan. [39] Atomin lisääntynyt kineettinen energia ilmenee myös lämpönä. Tällaista sirontan aikaan saamaa lämpötilan nousua sanotaan Joulekuumenemiseksi.



Kuva 14: Skemaattinen kuvaus diffusoituvan atomin elektromigraatiosta a) ennen aktivaatiotilaa ja b) aktivoidussa tilassa satulapisteesä puolessa välissä matkaa, jossa sillä on hallussaan erittäin laaja sirontan poikkileikkausalue [4].

Diffusoituvaan atomiin vaikuttaa sähkövoima

$$F_{EM} = Z^* eE = (Z_{el}^* + Z_{wd}^*)eE, \quad (7)$$

jossa Z^* on elektromigraation efektiivinen varausluku (yksikötön), $Z_{el}^* eE$ suora sähköstaattinen voima ja $Z_{wd}^* eE$ elektronituulen voima. [4] Z^* ei ole varaus eikä valenssi, vaan liikemäärän vaihdon suure, joka on tuloksena törmäyksistä elektronien ja diffusoituvien atomien välillä. Siten se on kriittisesti riippuvainen johtimen elektronisesta rakenteesta ja voi olla joko positiivinen tai negatiivinen riippuen onko sironta ensisijaisesti n- vai p-tyypin varauksenkuljettajista. Hyvin johtavissa metalleissa, kuten alumiinissa tai kuparissa, Z^* :n arvo on noin -1. [39]

Johdemetallille sähkökenttä voidaan ilmaista virrantiheyden ja sähköisen resistiivisyyden tulona, jolloin elektromigraation ajavan voiman yhtälöksi tulee

$$F_{EM} = Z^* e \rho j, \quad (8)$$

jossa ρ on resistiivisyys ja j on virrantiheys. Tämä yhtälö esittää ilmiön fysiikan tarkemmin kuin yhtälö (7). On johdonmukaisempaa ajatella elektromigraation aiheuttamaa massan kuljetusta seuraukseksi korkeasta virrantiheydestä ennemmin kuin tuloksena suoraan sähkökentästä. [39]

Elektromigraatio aiheuttaa metalli-ionien liikkumista paikoiltaan, mutta yhtenäinen atomien ja vakanssien massavuo ei aiheuta materiaaliin epäjatkuvuuskohtia. Sen sijaan vahinkoa aiheuttaa epätasapaino elektromigraatiovuossa – alueelle virtaavien atomien määrä ei ole yhtä suuri kuin alueelta pois virtaavien atomien määrä aikayksikköä kohden. Yleisimmät paikat eroavaisuuksille massavuossa ovat raerajojen kolmoispisteet ja keskenään erilaisten materiaalien rajapinnat. [4]

3.1.3 Jännitysgradientti

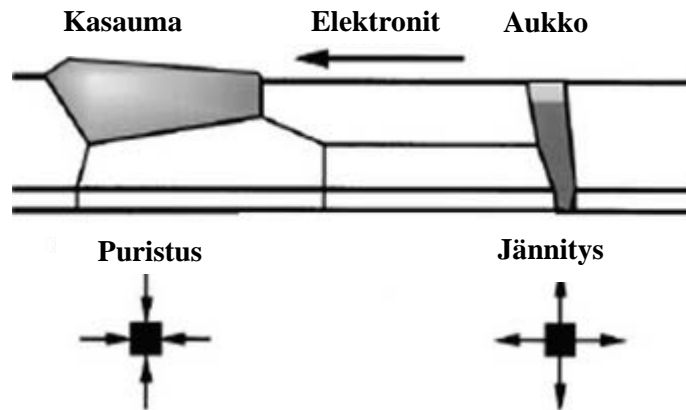
Diffuusio tyypillisissä puolijohteiden Al- ja Cu- metalloinneissa ilmenee vakanssimekanismin kautta, joten voitaisiin sanoa, että korkeat vakanssipitoisuudet ja vakanssien saostuminen aukoiksi aiheuttaa vikaantumisen elektromigraatiossa. Vakanssien määrä metalleissa on kuitenkin riippuvainen termisestä tasapainokonsentraatiosta – jos nieluja ja lähteitä on helposti saatavilla, vakanssien määrä pyrkii aina tasapainolukemiin. Jos vakanssikonsentraatio on termisen tasapainoarvon yläpuolella, vakansseja häviää nieluun kunnes tasapainoarvo on saavutettu. Samoin jos vakanssikonsentraatio on termisen tasapainoarvon alapuolella, vakansseja muodostuu lähteessä, kunnes terminen tasapainokonsentraatio on saavutettu. Tyypillisiä lähteitä ja nieluja ovat dislokaatiot hila- ja raerajoilla, jossa kiipeäminen yhteen suuntaan kuluttaa vakansseja, kun taas liike toiseen tuottaa niitä. [39]

Jos vakansseja poistetaan ilman täydennystä tai lisätään ilman tehokasta nielua, vakanssikonsentraation tasapainoa ei voida ylläpitää. Kun elektromigraation vaikutuksesta metalliatomeja kulkeutuu katodilta anodille, katodin alue on jännittyneenä ja anodin puristuksissa, kuten kuvassa 15 havainnollistetaan. Vastaavasti vakanssit kulkeutuvat päinvastaiseen suuntaan, jolloin jännittyneellä alueella on vakansseja enemmän ja puristuneella vähemmän kuin rasittumattomalla alueella. Näin ollen näiden päätyalueiden välillä on vakanssien konsentraatioero, joka vähenee mentäessä katodilta anodille. [4]

Konsentraatioero aiheuttaa materiaaliin jännitysgradientin

$$F_{\sigma} = \Omega \nabla \sigma_h, \quad (9)$$

jossa Ω on aktivaatitilavuus, jonka yleensä oletetaan olevan vakanssien tilavuus, ja σ_h on jännityksen hydrostaattinen komponentti [39]. Jännitysgradientti muodostaa massan siirtoa ajavan voiman, joka saa aikaan diffusoituvien metalliatomien vuon anodilta katodille eli vastakkaiseen suuntaan kuin elektromigraation ajama atomivuo. Tällainen tilanne voi muodostua vain, jos vakanssikonsentraatiotasapainoa ei voida ylläpitää. [4] Esimerkiksi johteen päissä voi olla atomien ja vakanssien liikettä estäviä rajoja, kuten kontakti puolijohteeseen tai toiseen metalliin, jossa diffuusiokerroin on häviävän pieni [39].



Kuva 15: Anodille kasaantuu atomeja, jolloin alue joutuu puristuksiin. Vastaavasti katodille kerääntyy vakansseja, ja alue on jännittyneenä. [42]

Vakanssien konsentraatiogradientti riippuu materiaalin pituudesta – mitä lyhyempi rakenne, sitä suurempi gradientti. Riittävän lyhyellä kappaleella gradientti on niin suuri, että se tasapainottaa elektromigraation vaikutuksen. [4] Kun nämä kaksi ajavaa voimaa tulevat yhtä suuriksi vastakkaisiin suuntiin, muodostuu vakaan tilan gradientti

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{Z^* e \rho j}{\Omega}. \quad (10)$$

Yhtälö (10) täyttyy vain jos jännitysgradienttiä pidetään yllä. Tämä voidaan saavuttaa, jos materiaali on riittävän vahva kestämään gradientin ylläpitämiseen koko johteen pituuden yli vaadittavat jännitykset. Jos vetojännitys tulee toisessa päässä liian suureksi, sinne voi muodostua aukko tai halkeama. Samoin toisen pään liian suuret puristusjännitykset voivat aiheuttaa puristeiden muodostumisen. [39]

Johteen kestämillä maksimijännityksellä voidaan laskea virrantiheyden ja pituuden tulo, joka määrittelee voiko johteessa ilmetä elektromigraatiota. Tämän tulon yläpuolella elektromigraatiota voi ilmetä, mutta sen alapuolelle jääessä ei. I. A. Blechin vuonna 1970 kehittämä yhtälöä kutsutaan Blechin tuloksi:

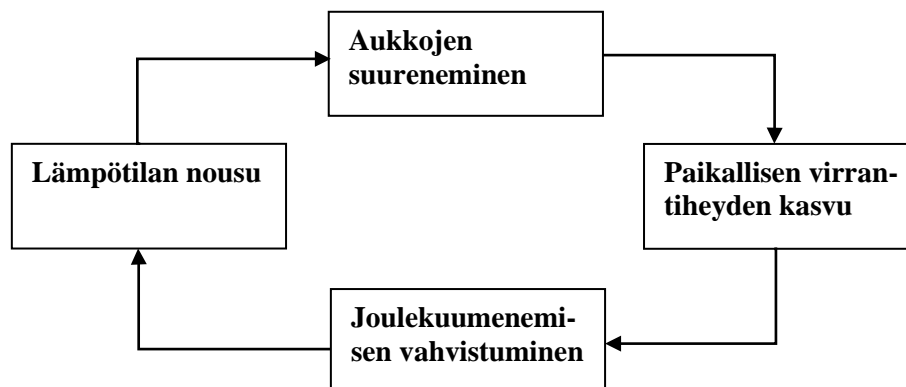
$$j l_B = \frac{(\sigma_m - \sigma_0) \Omega}{Z^* e \rho}, \quad (11)$$

jossa σ_0 on alkutilanteen hydrostaattinen jännitys johteessa, σ_m on suurin johteen kestävä hydrostaattinen jännitys, ja l_B on Blechin pituus. Blechin pituudella tarkoitetaan johteen pituutta, jonka alapuolella elektromigraatio estyy tietyllä virrantiheydellä j . Blechin pituutta lyhyemmissä johteissa siis elektromigraatiota ei tapahdu kyseisellä virrantiheydellä, kun taas sitä pidemmissä kyllä. Jos johderakenteet voitaisiin suunnitella siten, että $j l_B$ -tulo pysyisi kriittisen lukuarvon alapuolella, elektromigraation aiheuttamat luotettavuusongelmat saataisiin ratkaistua. Juoteliitoksissa tämä tarkoittaisi käytännössä sitä, että juoteliitosten tulisi olla riittävän matalia tai virta tulisi rajoittaa kriittisen tason alapuolelle. Pintaliitossovelluksissa juoteliitokset ovat paksuja ja virrantiheydet korkeita. [39] Tinapohjaisilla juotteilla tilanne on edellä kuvattua monimutkaisempi, koska diffuusio voi tapahtua myös välisijojen kautta.

3.1.4 Virran ahtautuminen

Suorissa johtimissa virta odotettavasti jakautuu yhtenäisesti matalilla virran taajuuksilla, mutta epäyhtenevyyttä ilmenee johtimen kääntymis- ja suppenemiskohdissa, rajapinnoissa joissa johtavuus muuttuu sekä aukkojen ja saostumien ympärillä johdematriisissa. Pintaliitoksissa johtimen ja juotenystyn välinen alue on myös epäyhtenevän virranjakautumisen aluetta. Tällaisilla epäyhtenevillä alueilla ilmenee paikallista virrantiheyden kasvua, jota kutsutaan virran ahtautumiseksi (*current crowding*). Virran ahtautuminen vaikuttaa merkittävästi elektromigraatioon. Materiaalin kidevirheillä, kuten vakansseilla ja löyhästi kiinni olevilla atomeilla oletetaan olevan korkeampi potentiaali korkean virrantiheyden alueilla kuin alhaisen virrantiheyden alueilla. Potentiaaligradientti virran ahtautumisen alueella mahdollistaa ajavan voiman työntämään nämä epätäydellisydet korkean virrantiheyden alueista matalille. [4]

Virran ahtautuminen aiheuttaa paikallista Joule-kuumenemista, joka nostaa johteen lämpötilaa. Lämpötilan nousu puolestaan vahvistaa elektromigraatiota, eli rakenteeseen muodostuu nopeammin aukkoja ja tihentymiä. [4] Aukkojen muodostuminen aiheuttaa virran tiheyden kasvamista, koska suureneva aukko pienentää johtimen poikkipinta-alaa. Kasvanut virrantiheys vahvistaa jälleen Joule-kuumenemista. Tätä kierrettä havainnollistetaan kuvan 16 kaaviossa. Prosessi jatkuu, kunnes aukko on riittävän suuri katkaisemaan johteen.



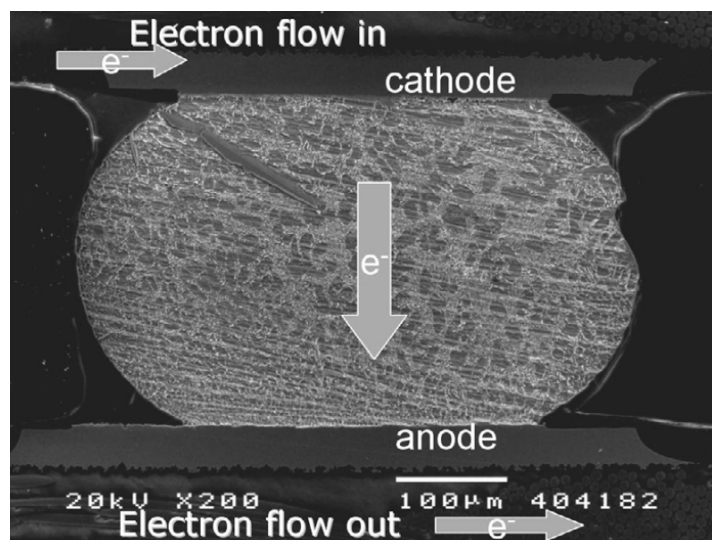
Kuva 16: Termisen kiihtyvyyden silmukka elektromigraation aikana.

3.2 Elektromigraatio juoteliitoksissa

Elektromigraation perusmekanismit ovat juoteliitoksissa samat kuin muissakin metallijohteissa [4]. Juoteliitokset ovat kuitenkin rakenteeltaan ja materiaaleiltaan merkittävästi erilaiset kuin integroiduissa piireissä käytetyt johteet, joten niiden elektromigraatiokäytäytymiseen liittyy ainutlaatuisia piirteitä. Juotenystyjen elektromigraation tutkimiseen on kehitetty JEDEC:n testistandardikin, joka on tarkoitettu erityyppisten juotenystyjen elektromigraatioherkkyyden arvioimiseen [29].

Elektroniikassa käytettävien johdinmateriaalien sulamispiste on korkea, esimerkiksi kuparilla 1084 °C ja alumiinilla 660 °C. Näiden materiaalien atomidiffuusio elektroniikan normaaleissa käyttölämpötiloissa on vähäistä, joten elektromigraation aikaan saamaan materiaalin siirtymiseen tarvitaan korkea virrantiheys riittäväksi ajavaksi voimaksi. Integroiduissa piireissä elektromigraatio alkaa olla merkittävää, kun johtimien virrantiheydet ovat luokkaa $10^5 \text{ A/cm}^2 - 10^6 \text{ A/cm}^2$. Juoteliitoksissa elektromigraatiota on kuitenkin havaittu ilmenevän jo merkittävästi tätä alemmilla virrantiheyksillä [43-45]. Useiden tutkimusten mukaan kriittisenä raja-arvona voidaan pitää jo 10^4 A/cm^2 virrantiheyttä [46, 47]. Elektroniikan piirien integroitua laajemmiksi kokonaisuuksiksi juotenystyjä pyritään jatkuvasti pienentämään etenkin tiiviiden sirujen sovelluksissa, kuten BGA:t ja kääntösirut, jolloin virrantiheydet kasvavat vastaavasti. Juotenystyn halkaisijan oletetaan pienenevän lähitulevaisuudessa 50µm:iin, jolloin keskimääräinen virrantiheys olisi jo kriittinen 10^4 A/cm^2 . [4]

Osasyynä elektromigraation ilmenemiseen juoteliitoksissa alhaisilla virrantiheyksillä on juotemateriaalien alhainen sulamispiste ja nopea atomidiffuusio juotteessa. Lisäksi juoteliitoksen rakenne, jossa virta kulkee ohuesta johtimesta paksuun juotenystyyn, johtaa korkeaan virran ahtautumiseen katodikontaktipinnalla aiheuttaen elektromigraation kiihtymisen. Virran ahtautumisen korkea virrantiheys nopeuttaa myös Joulekuumene- mista ja siten nopeuttaa elektromigraatiota. Keskeinen tekijä juotenystyjen elektromigraatioon on myös se, että nystyllä on kaksi rajapintaa. Kun nystyn läpi kulkee sähkövirta, kontaktit alusmetalloinnin ja juotosalustan kanssa tulevat anodiksi ja katodiksi virran kulkusuunnan mukaisesti, kuten kuvassa 17 esitetään. Tämä polaaraisuus vaikuttaa metallienvälisten yhdisteiden kasvuun eri rajapinnoilla [4]. Lisäksi selvästi kaksifaasisilla juoteseoksilla, kuten SnPb:llä, elektromigraation on havaittu aiheuttavan faasien voimakasta erkautumista juoteliitoksen eri puolille [4, 48]. Lyijyttömiä Sn-pohjaisia juotteita voidaan kuitenkin pitää käytännössä yksifaasisina, sillä muiden komponenttien määrät juotteessa ovat niin vähäiset. Siten tinapohjaisissa juotteissa ei erkautumista tapahdu merkittävästi. [4]

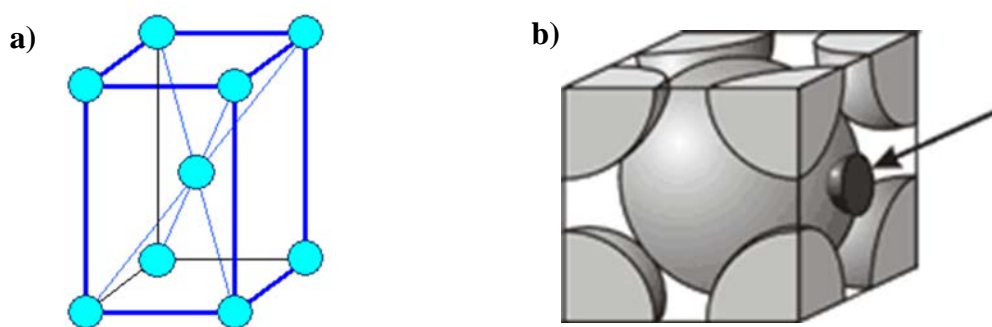


Kuva 17: Nystyn kontaktialueet piirilevyn ja komponenttisirun kanssa tulevat anodiksi ja katodiksi sähkövirran kulkusuunnan mukaisesti. [40]

3.2.1 Alhainen sulamispiste ja nopea atomidiffuusio

Elektromigraation kannalta merkittävänä pidetään lämpötilaa, joka on suurempi kuin puolet materiaalin sulamispisteestä Kelvineinä [40]. Toisin sanoen materiaalin homologinen lämpötila, eli lämpötilan suhde sulamispisteeseen (T / T_m), on yli 0.5. Juotemetalleilla on huomattavan korkea homologinen lämpötila kokoonpanon tavallisissa käyttöolosuhteissa. SnAgCu -juotteen sulamispiste on 217 °C (490K), joten huoneenlämpö (298 K) on 0.73 T_m . Tällöin juotemateriaalin vakanssitilojen määrä on huoneenlämmössä melko iso, mikä mahdollistaa materiaalivuon syntymisen diffuusiolla suhteellisen pienillä virrantiheyden arvoilla. Siten elektromigraatio voi olla merkittävää jo huoneenlämmössä.

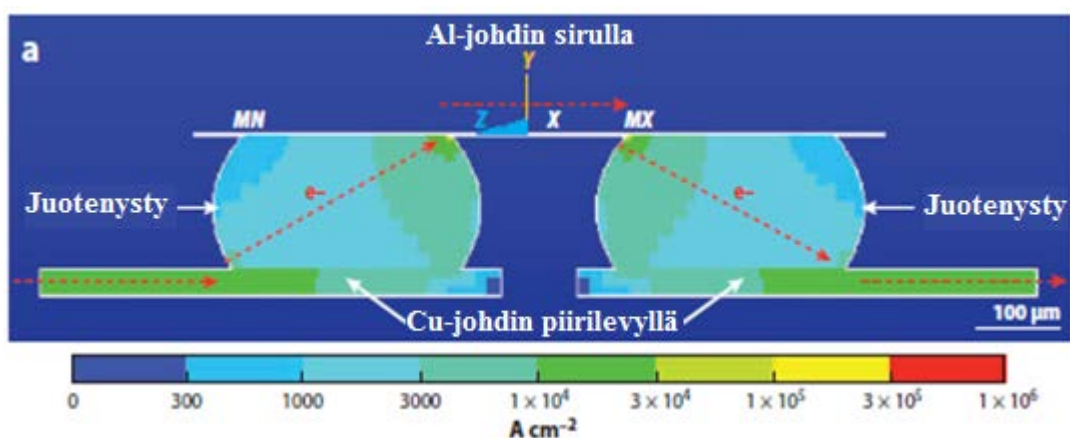
Vakanssivälitteisen tina-atomien diffuusion lisäksi tinapohjaisissa juotteissa tapahtuu muiden metallien välisija-atomidiffuusiota. Tietty metallit diffusoituvat tinassa hilan välisijoja pitkin erittäin nopeasti. Nämä nopean diffuusion metallit ovat tyypillisesti jaloja tai lähes jaloja alkuaineita, kuten Cu, Ag, Au ja Ni, ja niitä käytetään tavallisesti integroiduissa piireissä tai piirilevyissä johdemateriaalina osana juotenystyjen alusmetallointia (*under bump metallization, UBM*). Tinalla on kuvassa 18 a) esitettävä tilakeskinen tetragonaalinen (*body centered tetragonal, BCT*) hilarakenne, jossa on suhteellisen isot välisijat atomien välillä. Tina-atomia merkittävästi pienemmät nopean diffuusion atomit pystyvät olemaan välisijoissa ilman merkittävää rasitusta. Kuvassa 18 b) havainnollistetaan välisija-atomin sijainti tilakeskisessä kuutiohilassa. Lisäksi vakanssien muodostumisella ei tässä ole merkitystä, sillä välisija-atomidiffuusio ei tarvitse vakanssia diffusoituvan atomin siirtymiseen. Diffuusiovakio on välisija-atomidiffuusiosta hyvin korkea ja aktivaatioenergia alhainen, joten merkittävää diffuusiota tapahtuu jo alhaisissa lämpötiloissa. Toisaalta näiden atomien liukenevuuden on havaittu olevan alhainen, mikä rajoittaa massan siirtymistä. Diffuusiovakio riippuu olennaisesti diffusoituvan metalliatomin läpimitasta, mutta riippuvuus ei ole lineaarinen. Näiden pienien välisijoja pitkin siirtyvien metalliatomien nopea diffuusio juotteessa on keskeistä, koska ne muodostavat metallienvälisiä yhdisteitä tinan atomien kanssa. [39]



Kuva 18: a) Tilakeskinen tetragonaalinen hilarakenne, ja b) välisija-atomi tilakeskisessä kuutiohilassa.

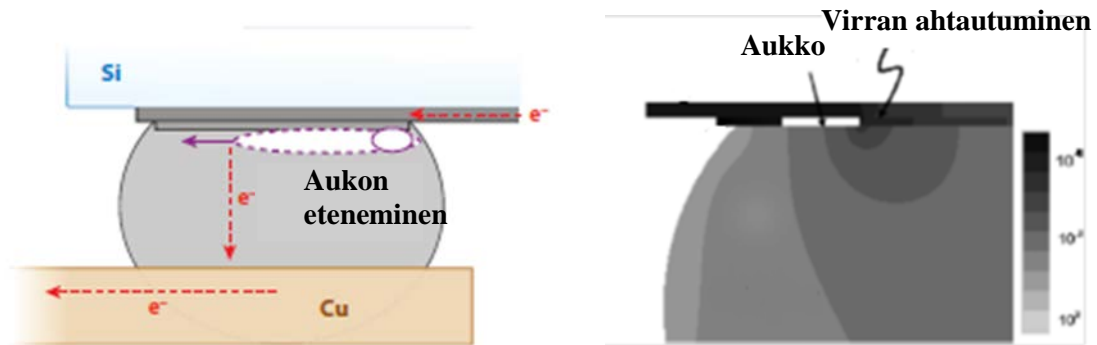
3.2.2 Virran ahtautuminen

Juoteliitoksen rakenne, jossa virta kulkee sirun ohuelta johtimelta paksumpaan juotenestyyn, aiheuttaa huomattavaa epätasaisuutta rakenteen virrantiheyksiin [49, 50]. Tämä on yksi tärkeimmistä tekijöistä, jotka vaikuttavat elektromigraatioon juoteliitoksissa. Sirun ja piirilevy johdinviivan poikkipinta-ala on kokoluokaltaan vähintään kaksi suuruusluokkaa pienempi kuin juotenestyn, joten nystyn ja johtimen välisellä kontaktipinnalla tapahtuu hyvin suuri virrantiheyden muutos, sillä sama virta kulkee niiden läpi. Koska sähkövirta kulkee alhaisimman resistanssin reittiä, suurin osa virtaa kulkee nystyyn lyhintä mahdollista tietä oikaisten nystyn nurkan kautta pienen kontaktialueen läpi aiheuttaen virran ahtautumisen. [4] Kuvassa 19 näytetään esimerkkinä poikkileikkauskuva tästä tilanteesta. Kuvassa ylhäällä on sirun Al ohutkalvo johdin, ja nystyjen alla piirilevyn Cu-johdin [16].



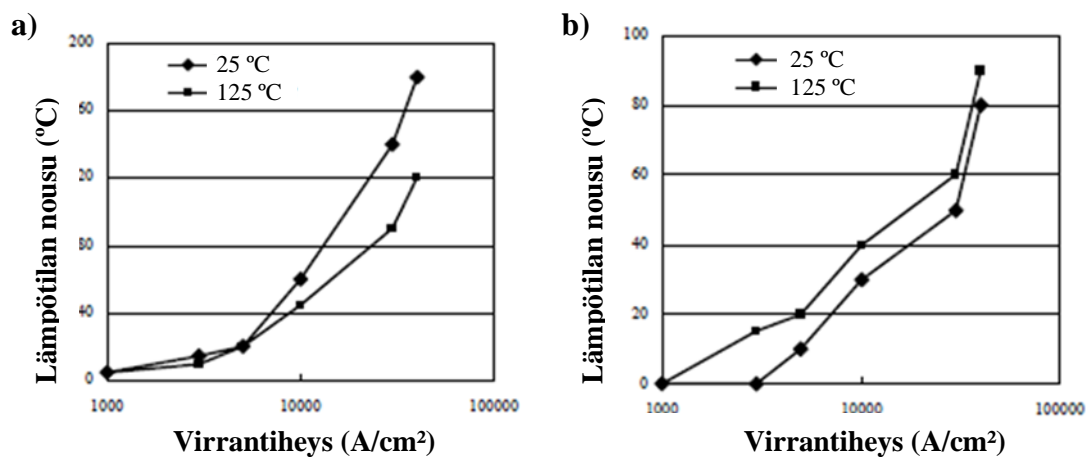
Kuva 19: Virrantiheys on suurimmillaan kohdissa, joissa virta kulkee ohuen johtimen ja juotenestyn rajapinnan läpi [16].

Kuten kuvasta 19 nähdään, virran ahtautumisella on kaksi merkittävää seurausta. Ensimmäinen on jyrkkä muutos virrantiheydessä juoteliitoksen rajapinnoilla, eli molemmiin puolin sitä pistettä jossa virta tulee ja poistuu nystystä. Toinen on virrantiheyden vaihtelu nystyn sisällä: virrantiheys juoteliitoksessa lähellä virran sisääntulopistettä on noin yhtä kokoluokkaa suurempi kuin keskimääräinen virrantiheys keskellä nystyä. [4] Virran ahtautuminen rajapinnoille johtaa useimmiten juoteliitosten elektromigraatiovikaantumiseen [46, 51, 52], ei niinkään keskimääräinen virrantiheys koko nystyssä. Vikaantuminen ilmenee useimmiten litteänä pyöreänä aukkona katodipuolella nystyä. Aukko saa tavallisesti alkunsa juotenestyn korkean virrantiheyden kulmasta, ja etenee kontaktialuetta pitkin kuvan 20 a) mukaisesti. [16] Kuvassa 20 b) on skemaattinen kuvaus virran ahtautumisen alueen siirtymisestä muodostuvan aukon reunan mukana, mikä saa aikaan aukon litteän muodon. Virran ahtautumisen on havaittu kiihdyttävän juoteliitoksen vikaantumista huomattavasti [44, 53]. Suurimmilla virrantiheyden alueilla aukot voivat muodostua ja levitä hyvinkin nopeasti johtuen kappaleessa 3.1.4 kuvatusta kiertestä aukon kasvamisen, virran ahtauman voimistumisen ja Joule-kuumenemisen pahenemisen välillä. [40]



Kuva 20: Skemaattinen kuvaus a) juotenystyssä etenevästä litteästä aukosta [16], ja b) virran jakautumisesta juotenystyssä, jossa virran ahtautumisen alue siirtyy muodostuvan aukon reunan mukana [54].

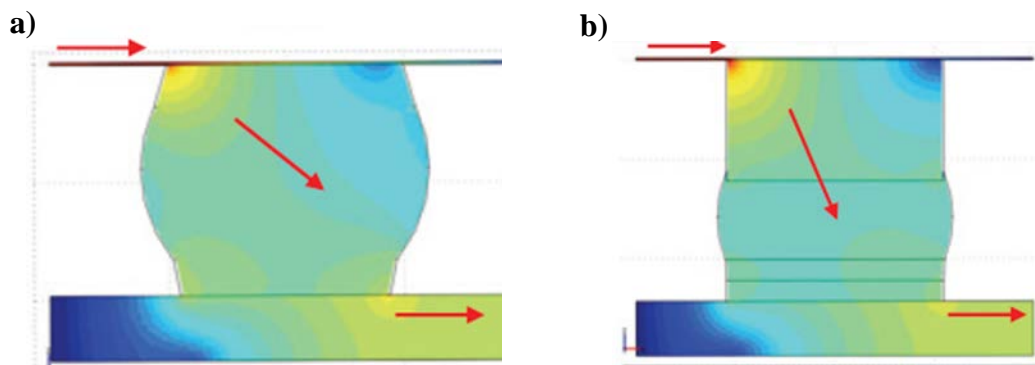
Lämpötilan kaksiuulotteista jakautumista juoteliitoksen eri osissa on tutkittu esimerkiksi infrapuna-kuvantamislaitteistolla. Tutkimuksessa testit tehtiin sekä huoneen lämpötilassa (25 °C) että 125 °C:ssa, jotta saatiin elektromigraation vaikutus esiin. Näytteisiin syötettiin DC-signaalia eri virrantiheyksillä välillä $10^3 - 10^5$ A/cm², ja lämpötilan jakautuminen nystyssä mitattiin. Mittaustulokset esitetään kuvassa 21, jossa kuvassa a) on esitetty käyrä lämpötilasta suhteessa virrantiheyteen ja kuvassa b) lämpötilasta keskimäärin koko juotteessa. Kuten käyristä nähdään, juoteliitoksessa havaittiin voimakas lämpötilan nousu suhteessa ympäröivään testilämpötilaan. Juotenystyn kulmissa lämpötila nousi pahimmillaan 180 °C:een, kun virrantiheys oli noin 4×10^4 A/cm² ja ympäröivä lämpötila oli 25 °C. Tämä on hyvin lähellä SnAgCu -juotteen sulamispistettä (noin 217 °C). [40]



Kuva 21: Lämpötilan nousu suhteessa virrantiheyteen juotteen a) kulmassa ja b) keskimäärin koko juotteessa [40].

Joule-kuumenemisen vaikutus elektromigraatioon voi olla paljon vakavampi kuin integroitujen piirien johdinmetalloinneissa, sillä integroitujen piirien tapauksessa metallointi yhdistyy tehokkaaseen lämpönieluun, piialustaan, jota juoteliitoksilla ei ole. Lisäksi juoteliitoksille ei voida käyttää samoja elektromigraation ehkäisykeinoja, kuten niin sanottua bamburakennetta tai pintakäsittelyjä, sillä juotosprosessi määrittelee juotenystyn kiderakenteen.

Virran ahtautumisen vaikutuksen vähentämiseen juoteliitoksissa on kuitenkin tutkittu kuparialusmetalloinnin paksuuden kasvattamista, jolloin virran ahtautuminen ilmenee juotteen sijaan kuparissa [55-57]. Kuparikerroksen käytön on havaittu pidentävän viikaantumiseen kuluvaa aikaa huomattavasti verrattuna ohutmetallointiin [58]. Menetelmää havainnollistetaan kuvassa 22, jossa kuvassa a) on tavallinen nysty ja kuvassa b) nystyn päällä on paksu kuparikerros [58]. Tavallisessa ohutkalvometalloinnissa, esimerkiksi Al/Ni/Cu UBM:ssä, kuparia on noin $0,4\ \mu\text{m}$ [16]. Paksuuden kasvattaminen $5 - 10\ \mu\text{m}$:iin sai suurimman osan virran ahtautumisesta ilmenemään kuparissa. Elektromigraation vaikutuksesta kuparia liukeni juotteeseen, ja vasta kun kuparikerros oheni alle $5\ \mu\text{m}$:iin, elektromigraatiolle tyypillinen aukko alkoi muodostua. [59] Jopa $50\ \mu\text{m}$ paksuisen Cu UBM:n käyttö näytti mahdollistavan virran jakautumisen läpi koko kuparimetallonnin, jolloin virrantiheys nystyssä oli huomattavan tasainen. Lähellä kuparin ja juotteen rajapintaa virran ahtautumista ei ilmennyt lähes ollenkaan. [60]

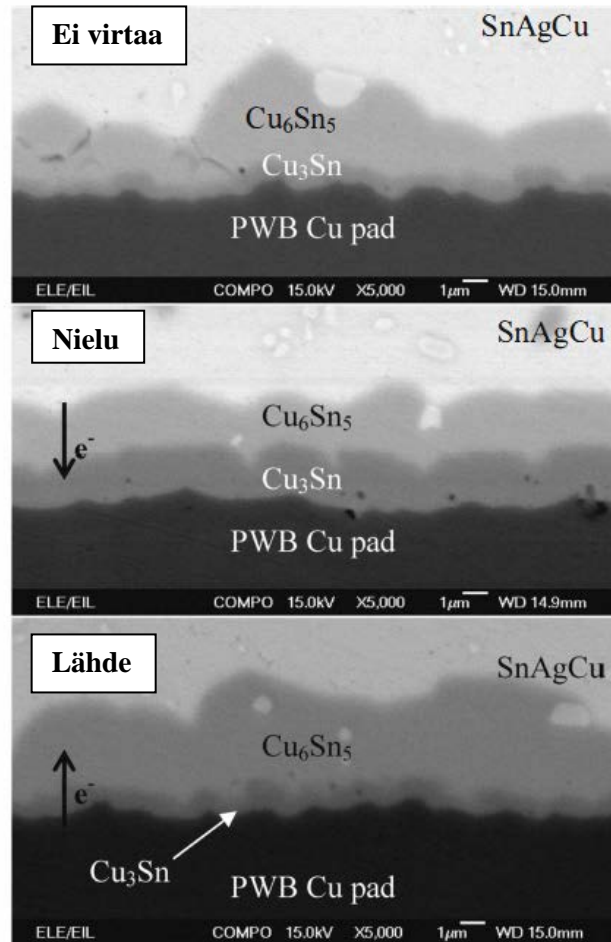


Kuva 22: Virran ahtautumisen vähentäminen juotenystyssä kuparikerroksen avulla. Virran tiheyden jakautuminen liitoksen alueella, kun a) juoteliitos on ilman kuparikerrosta b) juoteliitoksen päällä on paksu kuparikerros. [58]

3.2.3 Metallienvälisten yhdistekerrosten kasvu

SnAgCu -juotenystyjen elektromigraatiokäyttäytymisessä keskeistä on se, että sillä on kaksi rajapintaa. Kun nystyn läpi kulkee sähkövirta, kontaktipinnat UBM:n ja sirun kanssa tulevat anodiksi ja katodiksi [4]. Tämä vaikuttaa metallienvälisten yhdistekerrosten kasvuun juotenystyn molemmilla rajapinnoilla. Kuten aiemmin elektroniikan luotettavuusongelmien yhteydessä todettiin, IMC-kerrosten paksuus on keskeinen tekijä juoteliitosten luotettavuudessa. Useammassa tutkimuksessa on havaittu, että elektromigraation vaikutuksesta IMC-kerrokset kasvavat SnAgCu -juotteissa anodirajapinnalla nope-

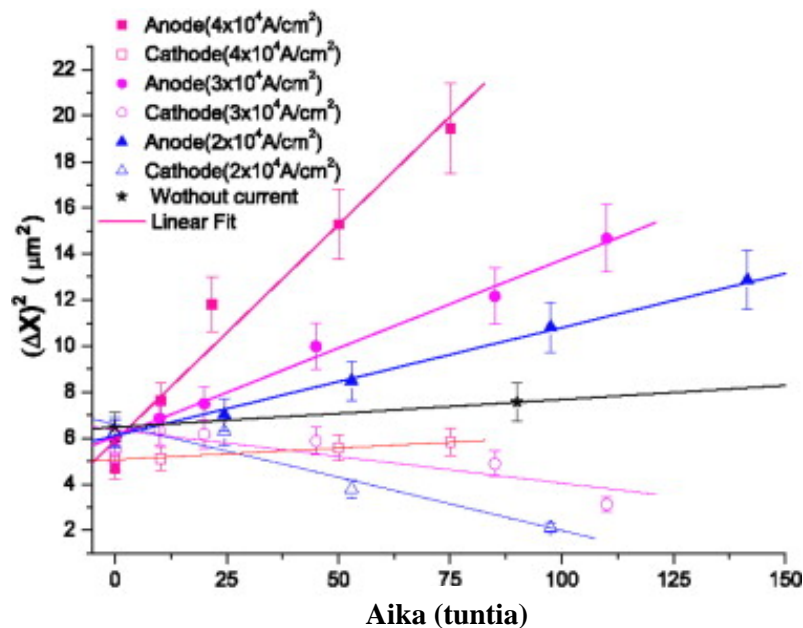
ammin kuin katodilla [40, 49, 61]. Huomattava eroavaisuus metallienvälisten yhdistekerrosten kasvukäyttäytymisessä anodilla ja katodilla on havaittu jo virrantiheydellä 1000 A/cm^2 [62-64]. Kuvassa 23 tätä havainnollistetaan kuvilla näytteistä, joista a) on rasitettu ainoastaan isotermisesti 125°C :ssä 750h:a, b) syötetty DC-virtaa 750h, kuva transistorin nielun puolelta eli katodilta ja c) sama DC virtaa 750h, mutta kuva lähteen eli anodin puolelta. [61]



Kuva 23: Juoteliitoksen piirilevynpuolinen rajapinta. A) hehkutettu 125°C :ssa 750h, b) syötetty DC-virtaa 750h nielun puolelta, ja c) syötetty DC-virtaa 750h lähteen puolelta. [61]

Simuloinnilla on arvioitu, että metallienvälisten yhdistekerrosten kasvunopeuden ja nystyn läpi kulkevan virrantiheyden välillä saattaa anodipuolella olla lineaarinen suhde [49]. Tätä myös tutkittiin eri virrantiheyksillä 120°C :ssa mittaamalla säännöllisin väliajoin IMC-kerrosten paksuus sekä anodi- että katodipuolella. Mittaustulokset esitetään kuvassa 24. Kuvaajan perusteella metallienvälisten yhdistekerrosten kasvunopeus anodilla ja katodilla on selvästi hyvin erilainen, ja yhtä pitkän virtarasituksen jälkeen kerros on anodilla aina paksumpi kuin katodilla. [65] Eräässä tutkimuksessa tosin katodipuo-

lenkin metallienvälisen yhdistekerroksen todettiin kasvavan nopeammin kuin ilman virtarasiitusta, kun näytteitä rasiitettiin 86 tuntia 125 °C:ssä virrantiheydellä $5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ [40]. Useimmissa tutkimuksissa tähän vertailuun ei oteta kantaa, vaan anodipuolen IMC:n vain todetaan kasvavan katodia nopeammin [49, 64]. Erilaisuuden anodin ja katodin metallienvälisen yhdistekerrosten kasvussa katsotaan johtuvan tina ja alusmetallin diffuusiosta juotteessa [4, 49] - elektromigraation vaikutuksesta sekä tina- että kupari-atomeiden vuo vahvistuu elektronivon suuntaisesti kohti anodia [61].



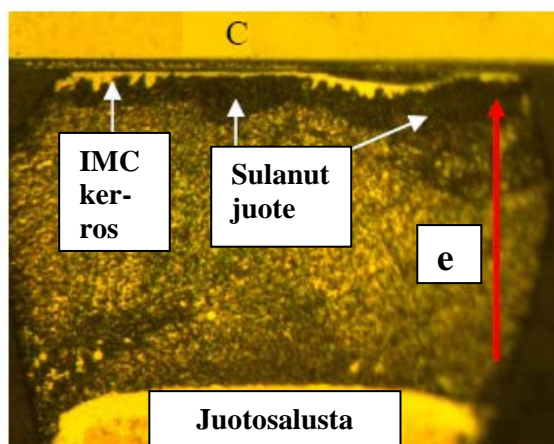
Kuva 24: IMC:n paksuuden muutos ajan funktiona eri virrantiheyksillä 120 °C:ssa [65].

Elektronivon suunnalla on metallienvälisen yhdistekerrosten kokonaispaksuuden kasvun lisäksi merkittävä vaikutus myös eri IMC-kerrosten, eli Cu_6Sn_5 :n ja Cu_3Sn :n, suhteellisiin paksuuksiin [61, 66]. Anodilla koko metallienvälisen yhdistekerroksen on katodia paksumpi, ja Cu_6Sn_5 ja Cu_3Sn ovat suunnilleen yhtä paksut. Katodilla sen sijaan Cu_6Sn_5 -kerros on huomattavasti paksumpi kuin Cu_3Sn . [61] Cu_3Sn :n ohuus johtuu siitä, että monifaasisissa diffuusiopareissa reaktiokerrosten kasvu on toisistaan riippuvaa. Sn- ja Cu- atomien vuo vahvistuessa elektronivon suuntaan eli kuparikontaktilta juotteeseen, Cu_6Sn_5 kuluttaa Cu_3Sn :a kasvuunsa $\text{Cu}_3\text{Sn}/\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ rajapinnalla. Kun Sn- tai Cu-vuot Cu_3Sn :n sisällä eivät vaihtelee merkittävästi, seuraa Cu_3Sn :n ohentuminen. [66] Iskukuormituksen nopeassa muodonmuutoksessa Cu_3Sn :n kasvulla on iso merkitys juotteen mekaaniseen kestävyys.

3.2.4 Juotteen sulaminen

Kuten aiemmin todettiin, juoteliitoksissa lämmön pois johtuminen ei ole tehokasta. Joule-kuumenemisen aiheuttama lämpeneminen ylittää korkeilla virrantiheyksillä helposti

sen mitä lämpöä poistuu johtumalla, jolloin liitoksen lämpötila nousee. Juotteilla on liitosalueen alhaisin sulamispiste, joten se on herkin lämmön nousulle. Jos esimerkiksi komponentinpuolisten ohuiden Cu-johtimien tai Al-metalloinnin lämpötila nousee 220 °C:een, kuparissa ja alumiinissa ei tapahdu muutoksia, mutta juotemetalli sulaa. Kuvas-
sa 25 on juotteessa tapahtunut paikallista sulamista lähellä kontaktia korkean lämpötilan metallointiin. [62] Sulafaasin on havaittu muodostuvan nimenomaan kohdassa, jossa komponentin kuparijohdin kohtaa juoteliitoksen, ja leviää siitä alaspäin juotteessa. Tätä kohtaamispistettä voidaan sanoa juoteliitoksen kuumaksi pisteeksi – virrantiheys on siinä huomattavasti suurempi kuin muualla juotteessa, samoin kuin lämpötila. [64]



Kuva 25: Juotenystyssä on tapahtunut paikallista sulamista lähellä kontaktia korkean lämpötilan metallointiin [62].

Lyijyttömien juotteiden elektromigraation tutkimisessa näytteitä rasietaan useimmiten sähkövirran lisäksi suurilla ulkoisilla lämpötiloilla. Tällä pyritään nopeuttamaan testiä helpottamalla diffuusiota sekä nystyn sisällä että rajapinnoilla. Juotenystyn lämpötila kuitenkin nousee voimakkaasti virrantiheyden kasvaessa ilman ulkoista lämmitystäkin, kuten edellä kuvatuissa esimerkeissä on tullut ilmi. Tällöin yhdistelmä testirakenteen isotermistä lämmittämistä ja paikallista kuumenemistä sähkövirran seurauksena on ongelmallinen. On mahdollista, että juotenystyn lämpötila nousee testin aikana paikallisesti liian korkeaksi, ja liitos sulaa, jolloin kiinteän tilan elektromigraatioteoria ei päde [40]. Tällöin tilannetta ei voi verrata todelliseen elektroniikkatuotteen kokemaan rasitukseen, sillä sulassa juotteessa metallien liukeneminen ja keskinäiset reaktiot ovat huomattavasti kiinteätä nopeampia. Korkeissa lämpötiloissa elektromigraation vaikutus metallienvälisten yhdistekerrosten muodostumiseen on epäilty olevan merkityksetön, sillä lähellä tinan sulamispistettä kemiallisen potentiaaligradientin, eli konsentraatioerojen, osallisuus rajapinnan reaktiotahtiin on huomattavasti vahvempi kuin elektromigraatiovoimien vaikutus [62].

4 Työn tarkoitus

Tämä työ on tehty Aalto-yliopiston Sähkötekniikan Korkeakoulun Elektroniikan Integroinnin ja luotettavuuden yksikössä. Työn sisältämä kokeellinen tutkimus on osa Suomen Akatemian rahoittamaa projektia ”Mechanism and control of electromigration in solder interconnections under power loading”, joka toteutetaan Intian tiedeinstituutin (Indian Institute of Science) kanssa.

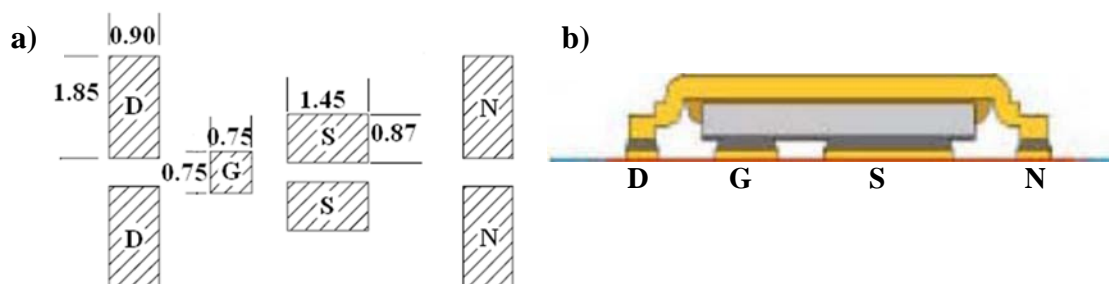
Työn tarkoituksena on tutkia elektromigraation vaikutusta lyijyttömän Sn3.0Ag0.5Cu juoteliitoksen luotettavuuteen lämpösyklauksella, pudotustestillä sekä tärytystestillä. Elektromigraation vaikutus pyritään saamaan selville vertaamalla suurille virrantiheyksille ennen luotettavuustestejä altistettuja juoteliitoksia termisesti esivanhennettuihin sekä kokonaan esikäsittelemättömiin juoteliitoksiin. Vertailuun käytetään sekä numeerista tietoa testikappaleiden vikaantumisajoista että poikkileikkausnäytteiden visuaalista tarkastelua mikroskoopilla ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Näillä menetelmillä pyritään saamaan selville, vaikuttaako suurilla virrantiheyksillä rasittaminen juotteen elinikään sekä vikaantumistapaan.

5 Tutkimusmenetelmät

Tämän työn kokeellinen tutkimus tehtiin Elektroniikan integroinnin ja luotettavuuden laboratoriossa. Testikokoonpanon esikäsittelyinä olivat hehkutus sekä elektromigraatiovanhennus. Luotettavuustestejä tehtiin kolme erilaista: lämpösyklus, pudotustesti ja tärytys. Testeissä noudatettiin JEDEC:n määrittelemiä standardeja tärytystestiä lukuun ottamatta. Vaurioanalyysi tehtiin valmistamalla valituista testkokoonpanoista sekä referenssikappaleista poikkileikkausnäytteitä. Näytteitä analysoidtiin sekä optisella mikroskoopilla että pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (*scanning electron microscope*, SEM).

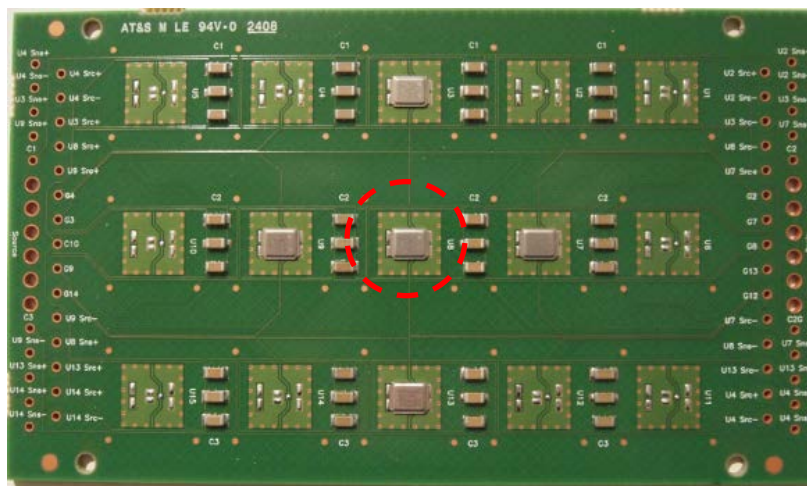
5.1 Testirakenne ja esivanhennukset

Tutkimuksessa käytettiin JEDEC:n pudotustestistandardista [23] mukailtuja kahdeksan-kerroksisia FR-4 lasikuituvahvisteisia epoksilaminaattipiirilevyjä – ainoastaan piirilevyn paksuus oli standardin 1 millimetrin sijaan 2. Piirilevyn muut ulkomitat olivat 132 x 77 mm. Piirilevyt teetettiin Austria Technologie & Systemtechnik:ssa ja testirakenteen kokoonpano toteutettiin laboratorion tuotantolinjalla. Testattava komponentti oli International Rectifierin IRF6716MPbF kanavatransistori. Se on tiiviissä DirectFET – pakkauksessa oleva pintakiinnitettävä MOSFET (*Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*), jolla on alhainen resistanssi ja alhainen toimintalämpötila [67]. Kontaktialueet on pinnoitettu nikkeli-hopealla. Kuvassa 26 a) esitetään komponentin kontaktialueiden sijoittelu ja mitat millimetreinä päältä kuvattuna ja kuvassa 26 b) rakenne sivulta. Komponentin keskimääräinen sivun pituus on 6.30 mm, leveys 4.93 mm ja korkeus 0.65 mm.



Kuva 26: Komponentin a) kontaktialueiden sijoittelu ja mitat päältä kuvattuna ja b) rakenne sivulta. [67] Kuviin on merkitty transistorin nielut (D), hila (G) ja lähteet (S), sekä tässä työssä virrattomana olevat liitokset (N).

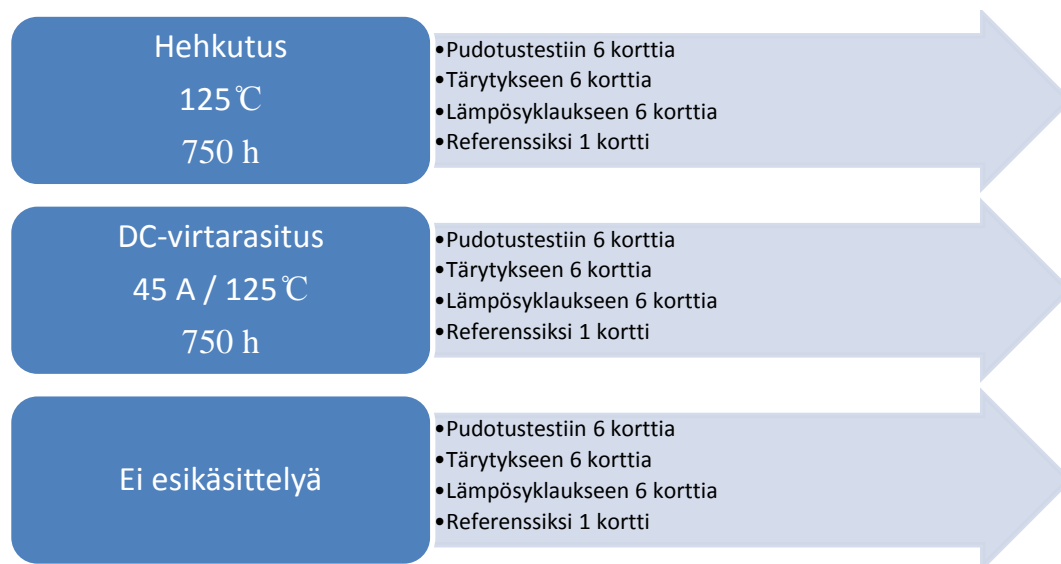
Komponentit kiinnitettiin piirilevyille juottamalla laboratorion pintaliitoslinjalla käyttäen valmistajan suosittelemaa reflow -profiilia. Juottamiseen käytettiin Loctite-Multicoren Sn3.0Ag0.5Cu juotepastaa. Jokaiselle piirilevyille kiinnitettiin yhteensä viisi komponenttia sijainteihin U2, U4, U8, U12 JA U14. Yksinkertaisuuden vuoksi näistä päädyttiin tutkimaan ainoastaan keskimmäistä (U8) komponenttia. Kuvassa 27 on esitetty testikokoonpano reflow-prosessin jälkeen.



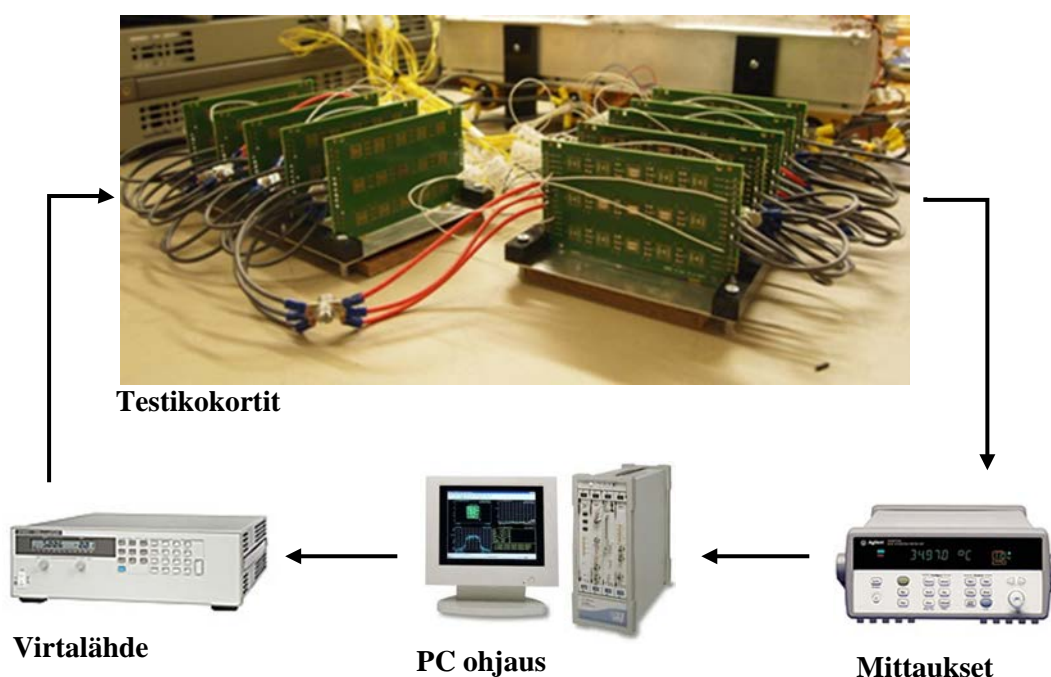
Kuva 27: Testikokoonpano reflow-prosessi jälkeen. Ainoastaan keskimmäistä komponenttia tutkittiin.

Testikokoonpanoja valmistettiin yhteensä 60 kappaletta. Nämä jaettiin kolmeen 20 kappaleen ryhmään, ja jokaiselle ryhmälle tehtiin eri esivanhennuskäsittely. Kaksikymmentä piirilevykorttia esivanhennettiin hehkuttamalla, kaksikymmentä syöttämällä DC virtaa komponentin läpi ja kahdellekymmenelle ei tehty esivanhennusta. Tämän jälkeen tehtiin luotettavuustestit: kustakin esikäsittelyryhmästä otettiin kuusi kokoonpanoa pudotustestiin, toiset kuusi täytykseen ja vielä kuusi lämpösyklaukseen. Jokaisesta esikäsittelyryhmästä otettiin myös yksi näyte referenssiksi, eikä niille siis tehty luotettavuustestiä. Kaavio eri esikäsittely-testiyhdistelmistä esitetään kuvassa 28.

Hehkuttamalla esikäsiteltävät testikappaleet pidettiin 125 °C:ssa uunissa 750 tuntia. Käsittelyyn käytettiin Heraeus -kiertoilmauunia. Hehkutuksen aikana komponenttien läpi ei kulkenut virtaa. DC-virralla esikäsiteltävät testikappaleet puolestaan altistettiin 45 ampeerin DC-virralla 750 tunnin ajan. Tällä virransuuruudella komponentit lämpenivät 125 °C:een. Ulkoista lämmitystä ei käytetty lainkaan, vaan käsittely tehtiin huoneenlämmössä (25 °C). DC-virtasyöttöön käytettiin testipenkkiä, jossa virta johdettiin Agilent 6672A virtalähteestä stabiloivan etuvastuksen kautta sarjaan kytkettyjen testikomponenttien läpi. Käsittelyssä oli kymmenen testikokoonpanoa kerrallaan. Transistorien hilojen syöttöjännite tuotiin säätövastusten kautta, jolloin transistorien häviöt saatiin säädettyä yhtäläisiksi. Vastukset komponenttien läpi mitattiin nelipistemittauksena viiden minuutin näytteenottovälillä Agilentin 34970A mittalaitteella. Mittaustulokset tallentuivat tietokoneelle, josta voitiin seurata virran suuruuden pysyvän vakiona. Käytetyn laitteiston periaate esitetään kuvassa 29.



Kuva 28: Kaavio testikokoonpanoille tehdyistä käsittelyistä. Tummallalla pohjalla on esivanhennustapa, vaalealla sitä seuraavat luotettavuustestit.



Kuva 29: Kaaviokuva DC-virtasyöttöön käytetystä laitteistosta.

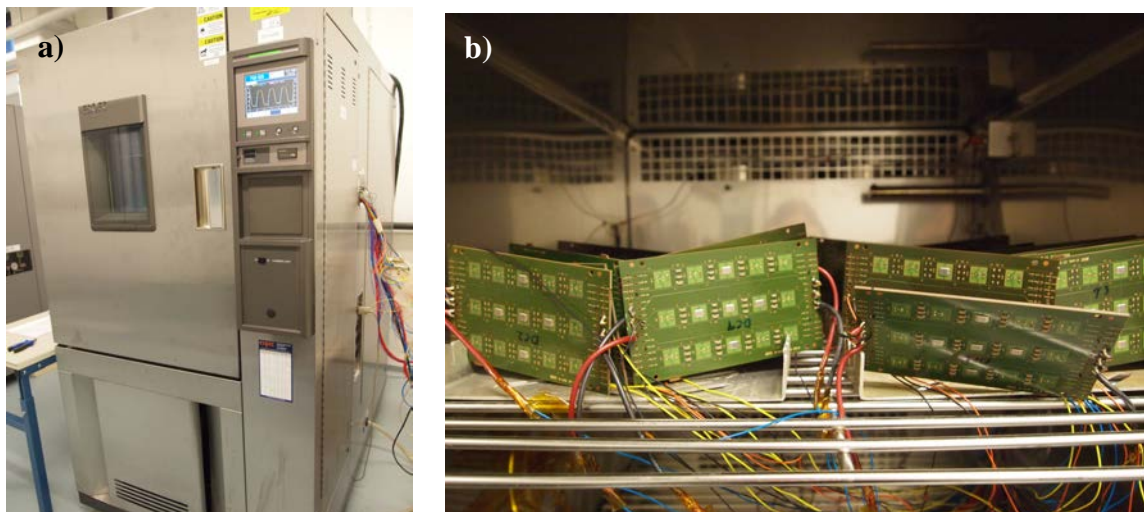
Taulukossa 4 esitetään vielä testatun komponentin juoteliitosten laskennalliset keskimääräiset virrantiheydet DC-virtasyötössä.

Taulukko 4: Tutkitun komponentin juoteliitosten laskennalliset keskimääräiset virrantiheydet.

	Lähde	Nielu
Liitoksen pinta-ala	1.148 mm ²	1.665 mm ²
Virta yhden liitoksen läpi	22.5 A	22.5 A
Keskimääräinen virrantiheys	1960 A/cm ²	1351 A/cm ²

5.2 Lämpösyklitesti

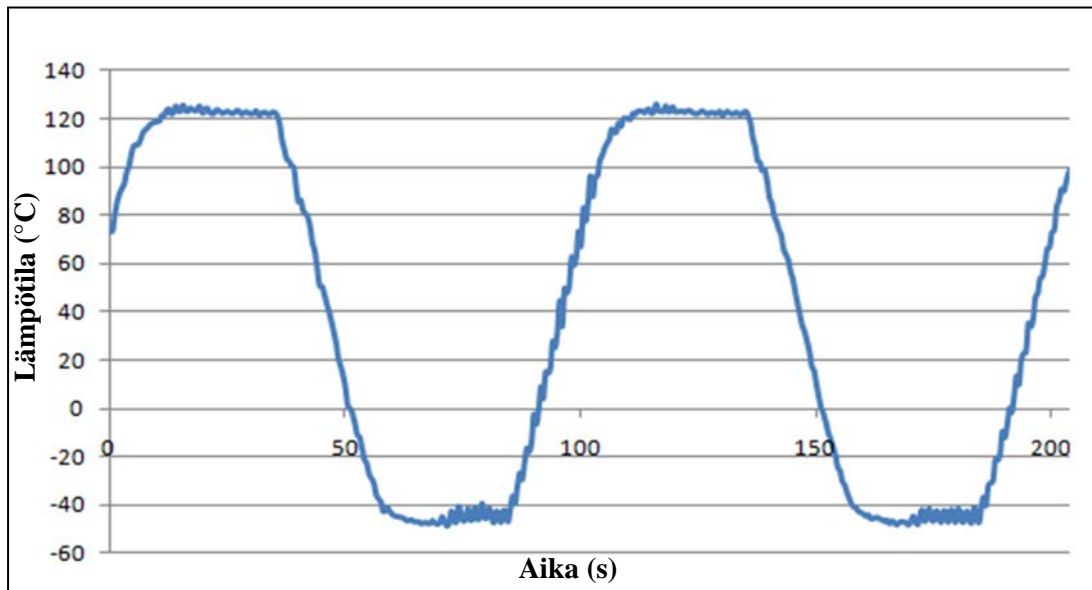
Lämpösyklitesti tehtiin yksikammioisella Espec EXN12.7.CWL -kaapilla, joka näkyy kuvassa 30 a). Kuvassa 30 b) näkyy kokoonpanot kaapin sisällä. Lämpösyklattavia kokoonpanoja oli yhteensä 18 kappaletta: kuusi hehkutettua, kuusi DC-virralla käsiteltyä ja kuusi esikäsittelemätöntä korttia. Transistorit asetettiin virtaa johtavaan tilaan kytkemällä niiden hiloille 12 voltin jännite. Testin aikana komponenttien vaurioitumista seurattiin mittaamalla niiden nielun ja lähteen välistä resistanssia tietokoneeseen liitettyllä Agilent 34970A -tiedonkeruujärjestelmällä. Komponentin vaurioituessa resistanssi kasvaa hiljalleen. Testistä poistettiin kokoonpanoja 1300 syklin (noin 3 kuukautta) jälkeen kaksi kustakin esikäsittelytyypistä, eli yhteensä kuusi levyä. Poistettaviksi näytteiksi valittiin kunkin ryhmän sisällä ne, joiden vastusarvo oli noussut eniten. Muiden testikokoonpanojen osalta testiä jatkettiin vikaantumiseen tai korkeintaan 8000 syklin asti.



Kuva 30: a) Lämpösyklaukseen käytetty Espec EXN12.7.CWL -testikaappi ja b) testikokoonpanojen sijoittelu kaapissa.

Kuvassa 31 on esitetty lämpösyklitestissä käytetty lämpötilaprofiili. Profiili noudattaa JEDEC:n lämpösyklitestistandardia JESD22-A104D [17], josta valittiin käyttöympäristöluokka G. Testin alälämpötila oli -40 °C ja ylälämpötila +125 °C. Pitoaika sekä

ylä- että alalämpötilassa oli 30 minuuttia, ja muutos aika äärilämpötilojen välillä 21 minuuttia.



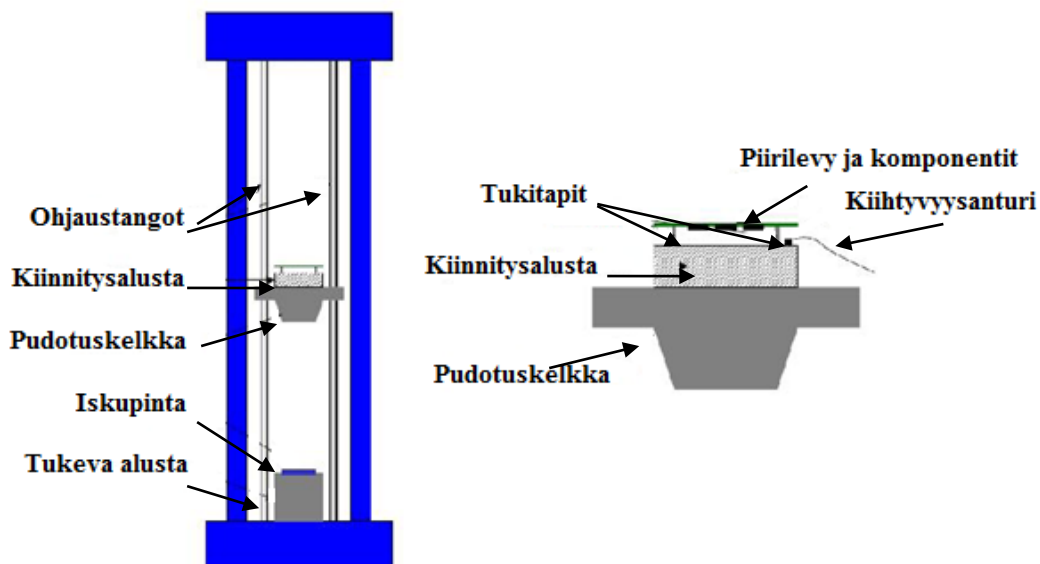
Kuva 31: Lämpösyklitestin mitattu lämpötilaprofiili kahden syklin ajalta.

5.3 Pudotustesti

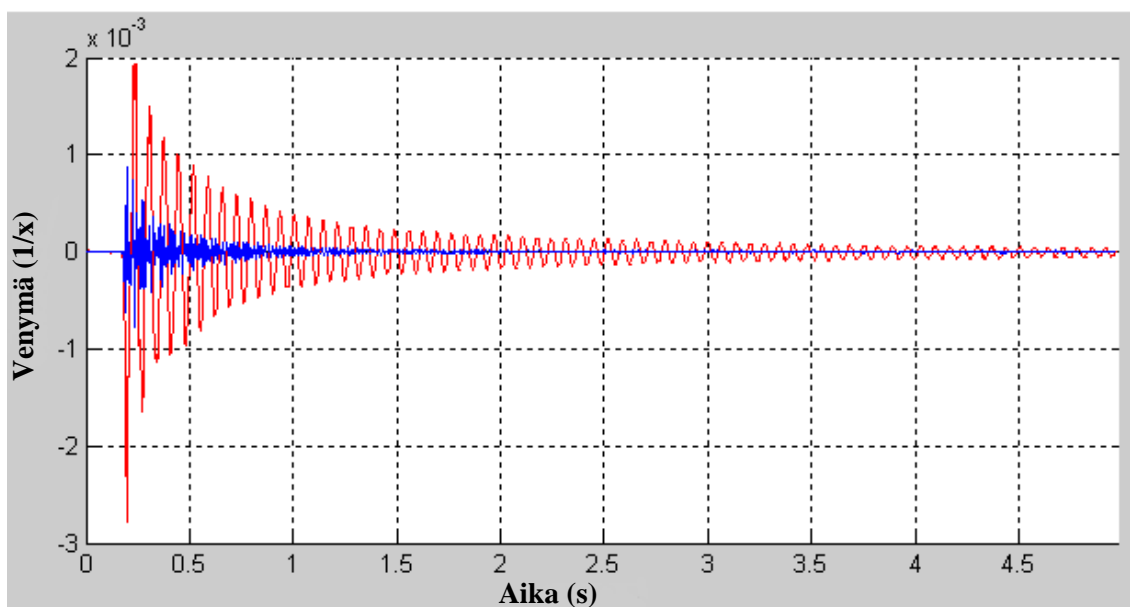
Pudotustestissä käytettiin Salon teknopajan valmistamaa JESD22-B111 standardin mukaista tyypillistä piirilevytason pudotustestilaitetta, joka esitetään kuvassa 32. Laite kohdistaa puolikkaan siniaallon muotoisen iskupulssin testikelkkaan joka pudotuksella. Moninkertaiset iskeytymiset estettiin magneettisella jarrulla, joka pysäyttää pudotuskelkan minimaalisella vaikutuksella levyn värähtelyyn. Testikappale kiinnitettiin ruuveilla pudotuskelkan kulmatukiin nurkistaan komponenttipuoli alaspäin, kuten kuvassa 32 esitetään. Samoin kuin lämpösyklitestissä, transistorin hilalle kytkettiin 12 voltin jännite. Kelkan annettiin pudota vapaasti vertikaaliseen suuntaan kahden ohjaustangon välissä valitulta korkeudelta. Kelkka iskeytyi alustaan, mistä aiheutuva kiihtyvyysspulssi siirtyi testilevyyn kelkan neljän kulmatuen kautta.

Kiihtyvyysspulssin huippuarvoa ja pulssin kestoä kontrolltoitiin pudotuskorkeudella ja alustan materiaalilla. JEDEC:n suosituksista iskurasitukselle [24] valittiin ympäristöluokka H, jossa pulssin huippuarvo on 2900G ja kesto 0.3 millisekuntia. Testiin valittiin standardin ankarin luokka, koska komponentin juoteliitokset ovat hyvin suuria suhteessa komponentin kokoon ja painoon. Näin ollen sillä on oletettavasti hyvä luotettavuus. Pulssi määriteltiin mittaamalla oikeanlaiseksi säätämällä pudotuskorkeutta ja asettamalla iskualustalle ohut matto. Kiihtyvyys mitattiin Kistlerin tyypin 8704B5000 kiihtyvyyssanturilla, joka kiinnitettiin pudotuskelkan päällistasoon keskelle. Koska pudotuskelkan kitka ohjaustankoihin kasvaa laitteen käytön myötä, kiihtyvyysspulssia tarkkailtiin säännöllisesti ja pudotuskorkeutta mukautettiin ylläpitämään yhtenäiset kiihtyvyysolosuhteet. Testilevyn kokema venymä puolestaan mitattiin kaksisuuntaisella venymä-

liuska-anturilla (Kyowa Strain Gauge: KFG-2-120-D16-11 L3M2S), joka kiinnitettiin piirilevyn pohjapuolelle keskimmäisen komponentin kohdalle. Mittauksessa saatu venymäprofiili esitetään kuvassa 33.



Kuva 32: Kaavakuva JESD22-B111 standardin mukaisesta pudotustestausjärjestelmästä. Vasemmalla esitetään koko laitteisto, ja oikealla pudotuskelkan eri osat. [23]

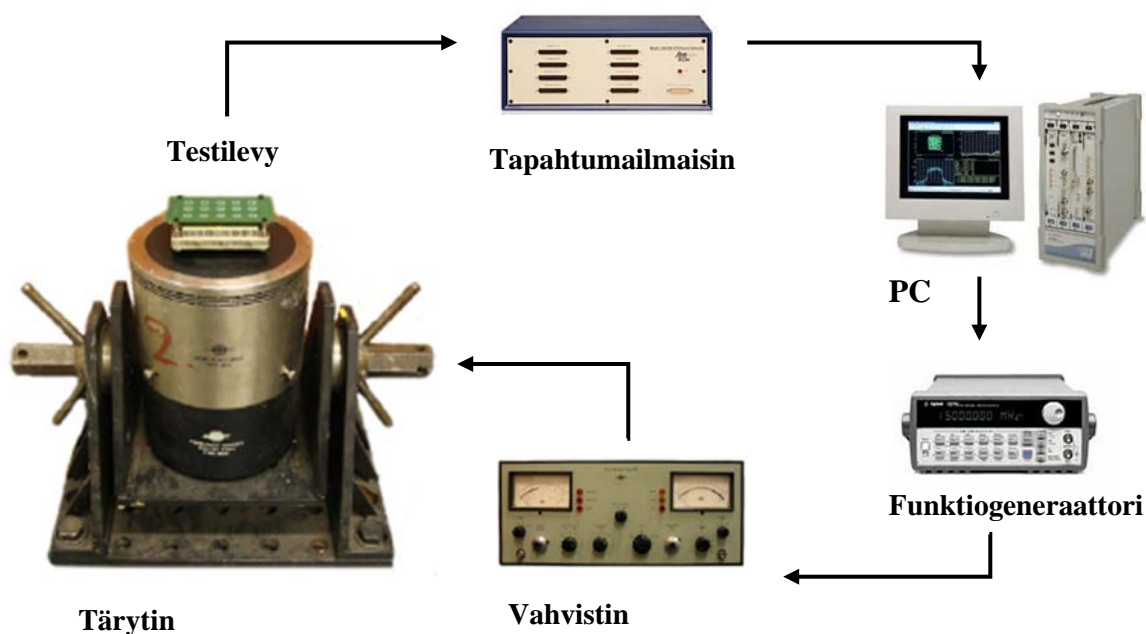


Kuva 33: Testilevyn kokema venymä yhden pudotuksen seurauksena. Punaisella on venymä pitkittäissuunnassa ja sinisellä poikittaissuunnassa.

Pudotustestille altistettiin kahdeksantoista testikappaletta: kuusi termisesti esivanhennettua, kuusi DC-virtasyötöllä käsiteltyä ja kuusi käsittelemätöntä korttia. Pudotustestiä jatkettiin kunkin testikappaleen kohdalla vaurioitumiseen asti. Vaurioitumista seurattiin mittaamalla resistanssia komponentin nielun ja lähteen välillä. Ehjän komponentin resistanssi on hyvin pieni, kun vaurioituneen kasvaa hyvin nopeasti. Resistanssin seuraamiseen käytettiin Analysis tech:n128/256 STD mallin tapahtumailmaisinta, joka havaitsi yli yhden mikrosekunnin kestävät $1000\ \Omega$ ylitykset. Tällaisesta ylityksestä laite antoi virheilmoituksen tietokoneelle Analysis Tech WinDatalog v2.4.0 ohjelmalle. Samanlainen resistanssin kasvu seuraa myös johtojen irtoamisesta tai vaurioitumisesta, joten ensin tarkistettiin niiden kunto. Tämän jälkeen testiä jatkettiin kunnes voitiin todeta JESD22-B111standardin mukainen vaurio, jossa ensimmäistä kynnysarvon ylitystä seuraavilla viidellä pudotuskerralla syntyy vielä yhteensä kolme vikailmoitusta.

5.4 Tärytystesti

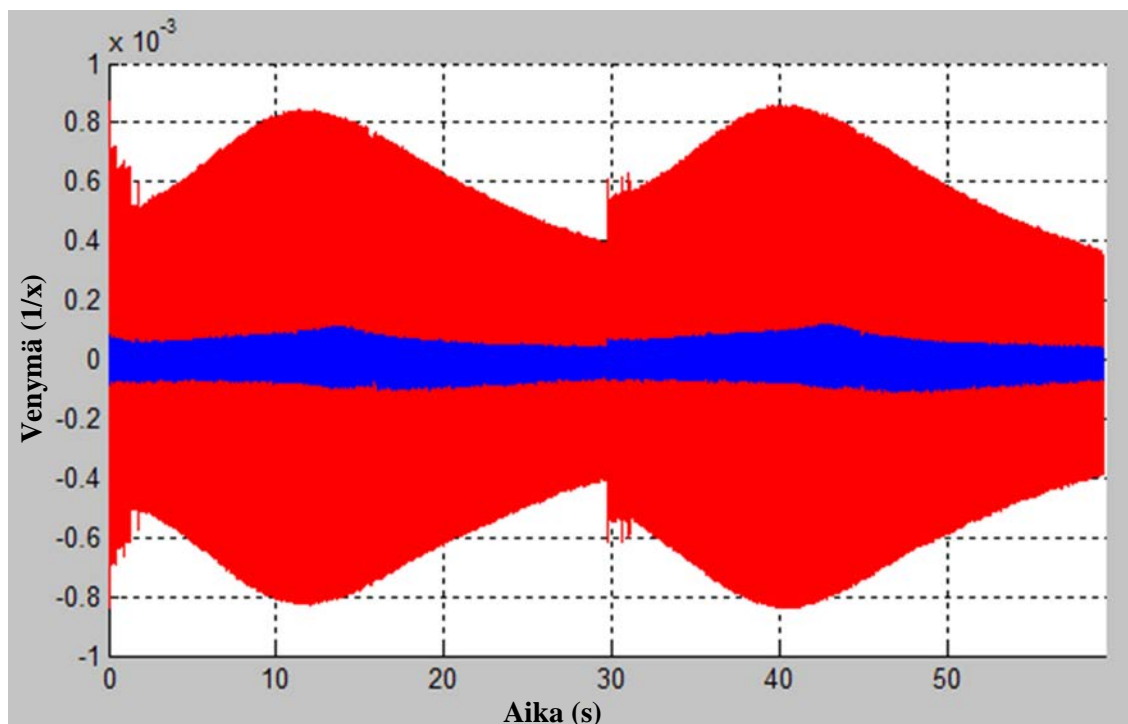
Tärytystestiin käytetyn laitteiston kaaviokuva esitetään kuvassa 34. Testilaitteisto koostuu Brüel & Kjaerin sähkömagneettisesta täryttimestä (Permanent Magnet Type 4805, Mode Study Head type 4814), vahvistimesta (700W Power Amplifier Type 2707) sekä funktiogeneraattorista (Agilent 33120A). Täryttimelle syötettävän signaalin muodostusta ohjattiin tietokoneella LabWiev ohjelmalla. Funktiogeneraattori syötti tietokoneen määrittelemää signaalia vahvistimen kautta täryttimelle. Tärytimeen menevä signaali sai magneettikentässä lepäävän kelan liikkumaan, jolloin tärytimeen aksiaalisesti kiinnitetty tukilevy alkoi liikkua ylös ja alas signaalin tahdissa. Testilevy oli kiinnitetty tukilevyyn kulmistaan neljällä ruuvilla samoin kuin pudotustestissä, jolloin liikkeestä aiheutui kokoonpanoon mekaanisia rasituksia.



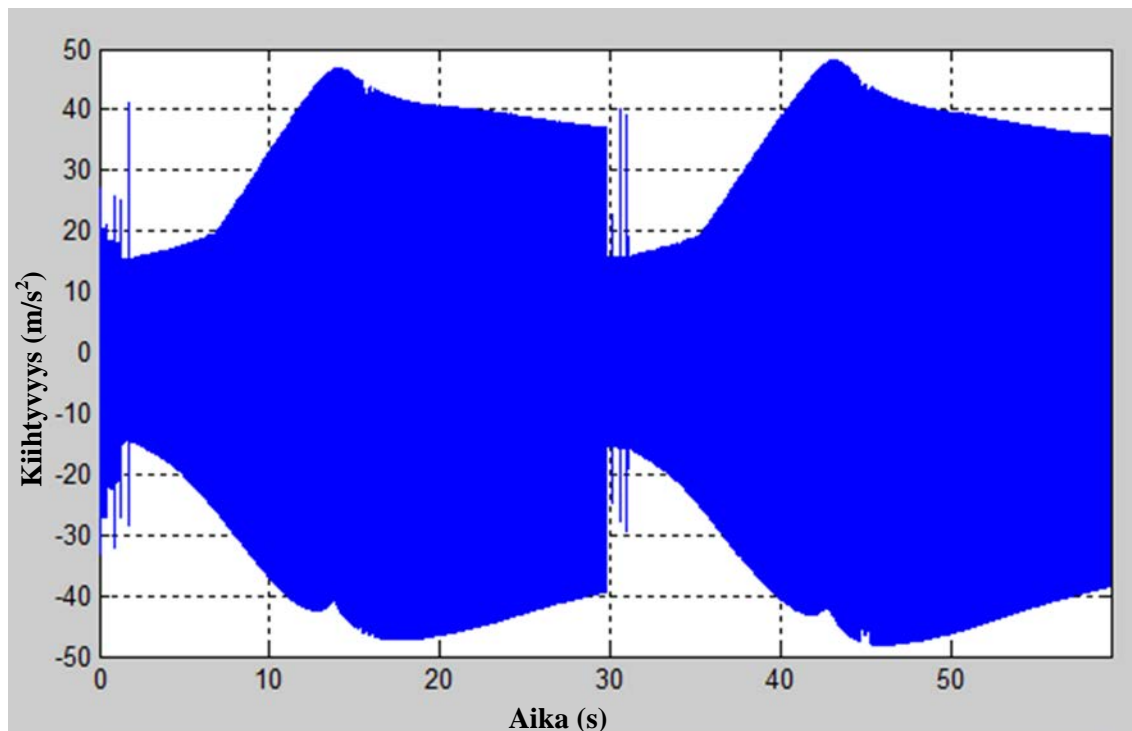
Kuva 34: Kaaviokuva tärytystestiin käytetystä laitteistosta.

Tärytykseen käytettiin siniaaltosignaalia, jolla pyyhkäistiin lineaarisesti kapeaa taajuuskaistaa testikokoonpanon alimman resonanssitaajuuden ympärillä. Resonanssitaajuuudet määritettiin kaksisuuntaisella venymäliuska-anturilla (Kyowa Strain Gauge: KFG-2-120-D16-11 L3M2S), joka kiinnitettiin piirilevyn pohjapuolelle keskimmäisen komponentin kohdalle. Resonanssitaajuudeksi saatiin noin 360 Hz. Signaalin amplitudi puolestaan valittiin sellaiseksi, että kokoonpanon kokema kiihtyvyys oli selvästi pienempi kuin pudotustestin 2900G. Mittausten perusteella taajuusalueeksi valittiin 350–380 Hz, amplitudiksi 2.7 V, ja pyyhkäisyajaksi 30 s. Kuvassa 35 esitetään käytetyllä signaalisyklillä saatavat testilevyn venymät sekä kuvassa 36 kiihtyvyys. Kuvissa mittaus on kahden syklin ajalta. Kiihtyvyyksien mittaamiseen käytettiin PCB 352B01 kiihtyvyysanturia, joka kiinnitettiin täryttimen tukilevyyn tukitapin viereen.

Tärytystestille altistettiin kahdeksantoista testikappaletta: kuusi termisesti esivanhennettua, kuusi DC-virtasyötöllä käsiteltyä ja kuusi käsittelemätöntä korttia. Testiä jatkettiin kunkin testikappaleen kohdalla vaurioitumiseen asti. Vaurioitumista seurattiin mittaamalla resistanssia komponentin nielun ja lähteen välillä, samalla tavoin kuin lämpösyklus- ja pudotustestissä. Resistanssin seuraamiseen käytettiin Analysis tech:n128/256 STD mallin tapahtumailmaisinta, joka havaitsi yli yhden mikrosekunnin kestävät 500 Ω ylitykset. 500 Ω :n herkkyys oli tarkin, jolla saatiin luotettavia mittaustuloksia, sillä täryttimen voimakas magneettikenttä aiheutti mittauksiin häiriötä. Riittävän korkealla vastusarvolla varmistettiin virheilmoitukset testikokoonpanon vikaantumisesta johtuviksi. Laite antoi ylityksestä ilmoituksen tietokoneelle, joka katkaisi virransyötön.



Kuva 35: Testissä käytetyn signaalisyklin aiheuttamat piirilevyn venymät kahden syklin aikana. Punaisella on venymä pitkittäissuunnassa ja sinisellä poikittaissuunnalla.



Kuva 36: Testissä käytetyn signaalisyklin aiheuttama piirilevyn kiihtyvyys kahden syklin aikana.

5.5 Juoteliitosten tutkiminen mikroskopiolla

Juottamisen jälkeen liitosta on vaikea tutkia rikkomatta komponenttia, eikä pintapuolisella tarkastelulla tai röntgenillä päästä useimmiten riittävän tarkalle tasolle. Ainetta rikkovilla menetelmillä sen sijaan päästään tutkimaan liitosta huomattavasti paremmin, mutta samalla testikappale menetetään eikä sitä voida enää käyttää testin jatkamiseen tai muiden näytteiden valmistukseen. Ennen näytteen valmistamista ainetta rikkovalla menetelmällä tuleekin määritellä tarkasti haluttu tutkimuskohde, leikkaussuunta sekä tutkimiseen käytettävät menetelmät. Yleisin ainetta rikkova menetelmä on poikkileikkausnäytteen valmistaminen, jota käytettiin tässäkin työssä testattujen juoteliitosten tarkasteluun niiden vikaantumisen jälkeen.

Poikkileikkausnäytteiden valmistuksessa komponenttialue sahattiin irti piirilevystä karkealla leikkurilla, ja palasen tarkasteluun haluttu sivu hiottiin hyvin lähelle komponentin reunaa. Komponentti valettiin epoksiin, jotta näytteen työstäminen helpottuisi ja säilyvyys paranisi. Tarkasteltavalta pinnalta hiottiin esiin haluttu juoteliitosten kohta karkealla vesihiomapaperilla, josta siirryttiin asteittain hienojakoisimpiin papereihin 1200 grit:n paperiin asti tasaisen hiontapinnan saamiseksi. Hionnan jälkeen näytteet vielä kiillotettiin hienojakoisilla kiillotuskankailla, jotta pinnasta saataisiin naarmuton ja kirkas. Hiovana osana kankailla käytettiin piikarbidipartikkeleja sisältäviä kiillotuspastoja.

Poikkileikkausnäytteitä tutkittiin valomikroskoopilla, ja tarvittaessa tarkempaan analyysiin käytettiin JEOL JSM-6335F pyyhkäisyelektronimikroskooppia, jolla saadaan näytteestä maksimissaan 500000x suurennos 1,5nm pisteresoluutiolla. Valomikroskooppi on optinen instrumentti, jossa kuva muodostetaan näkyvän valon ja lukuisien linssien avulla. Sillä päästään tyypillisesti 2000 -kertaiseen suurennoksiin 1 μ m resoluutiolla. Mikroskoopin erotuskykyyn vaikuttaa näytteen pinnan tasaisuus, sillä mikroskoopin syvyystarkkuus ei ole kovin hyvä – etenkin korkeilla suurennoksilla pinnan tulee olla erittäin tasainen tarkan kuvan saamiseksi. Valomikroskoopilla voidaan tarkastella näytettä usealla eri tavalla. Toimintatapa valitaan sen perusteella, mitä pinnan erityispiirteitä halutaan paremmin esiin. Näytteeseen kohdistettava valo voidaan esimerkiksi polarisoida, mikä mahdollistaa epäsymmetrisistä kiteistä koostuvan näytepinnan mikrorakenteen tarkemman tarkastelun; eri orientaation tai taitekertoimen omaavat pinta-alueet heijastavat polarisoitua valoa eri suuntiin, jolloin ne näkyvät kuvassa erivärisinä.

Pyyhkäisyelektronimikroskoopin toimintaperiaate on samantapainen kuin valomikroskoopin, mutta fotonien sijasta käytetään elektroneja, linssit toteutetaan sähkömagneettisesti ja mikroskoopin sisällä on tyhjiö. Tyhjiö tarvitaan, jotta elektronit eivät siroa ilman molekyyleistä ennen näytteeseen osumista. Pyyhkäisyelektronimikroskoopissa nanometriluokkaa oleva pistemäinen elektronisuihku ohjataan käymään koko näytepinta läpi. Kuva muodostuu näytteen pinnasta sironneiden elektronien avulla. Kuva voidaan muodostaa mittaamalla näytteestä tulevia toisioelektroneja, takaisinsirontasäteilyä, Auger-elektroneja tai röntgensäteilyä. Tässä työssä käytettiin takaisinsirontaa (*backscatter*), jossa mitataan syvemmälle näytepintaan tunkeutuneita ja takaisin näytteestä tulevien elektronisuihkun elektronien määrää. Niiden avulla saadaan hyvä kontrastiero näytteen alueiden alkuainekoostumuksien suhteen. Takaisin sironneiden elektronien määrä on kuitenkin niin pieni, että kuva ei ole yhtä kirkas ja tarkka kuin toisioelektroneilla. Elektronimikroskoopin erotuskyky on merkittävästi suurempi kuin valomikroskoopin – se voi yltää jopa 10⁵-kertaiseen suurennokseen. Erotuskyky on parhaimmillaan 1 nm ja syvyystarkkuuskin on selvästi optista parempi.

6 Tulokset

Tässä osiossa esitellään luotettavuustesteissä saadut tulokset ja vertaillaan eri testiyhdistelmän kokeneita näytteitä toisiinsa. Vertailuun käytetään sekä numeerista tietoa testikappaleiden hajoamisnopeuksista että poikkileikkausnäytteiden visuaalista tarkastelua valomikroskoopilla ja elektronimikroskoopilla. Myös pelkän esikäsittelyn vaikutuksia juotteen mikrorakenteeseen arvioidaan poikkileikkausnäytteitä tutkimalla. Eri esikäsittelyiden välillä havaittiinkin olevan selviä eroja juoteliitoksen mikrorakenteen muutoksissa. Komponentin liitos, jossa ei kulje virtaa, jätetään tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

Kokeellisen työn tuloksista käy ilmi, että esikäsittely vaikuttaa juoteliitoksen termomekaanisen rasituksen kestoon. Esikäsitlemättömien ja hehkutettujen testikokoonpanojen vikaantumisnopeudessa ei havaittu merkittävää eroa, ja vikaantuminen aiheutui lähdejuotteen murtumisesta uudelleenkiteytyneiden alueiden raerajoja pitkin. DC-virtarasitetut näytteet sen sijaan osoittautuivat muita kestävämmiksi – yksikään näyte ei vikaantunut testissä. Sen sijaan esikäsittelyjen vaikutusta juotteen mekaaniseen rasituksen kestoon ei havaittu tutkimuksen virherajoihin nähden. Tulosten hajonta tosin on huomattava kaikissa esikäsittelyryhmissä. Sekä pudotus- että tärytystestissä kuitenkin havaittiin eroja eri esikäsittelyn kokoneiden liitosten vikaantumistavassa.

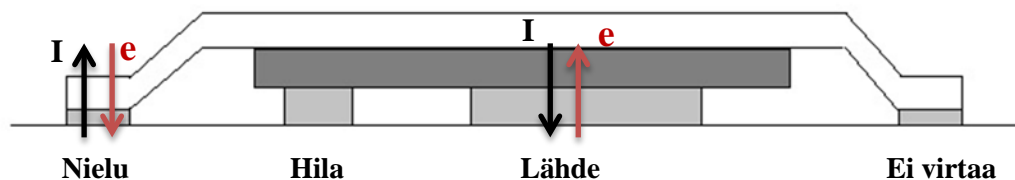
Tulosten käsittely on työssä jaettu viiteen osaan. Ensin tarkastellaan esikäsittelyiden aiheuttamia mikrorakenteellisia muutoksia testikappaleiden juotteissa, jonka jälkeen esitellään lähemmin eri luotettavuustesteillä saatuja tuloksia; lämpösyklitestin, sitten pudotustestin ja vielä tärytystestin tulokset. Lopuksi vertaillaan eri luotettavuustestien tuloksia toisiinsa.

6.1 Esikäsittelyjen vaikutus mikrorakenteeseen

Kuten kappaleessa 5.1 kerrottiin, osa testikokoonpanoista esikäsiteltiin isotermisesti hehkuttamalla, osa altistettiin DC-virtarasitukselle ja osalle ei tehty esikäsittelyä. Tässä kappaleessa tarkastellaan juoteliitosten mikrorakennetta sekä piirilevyn puoleisen rajapinnan metallienvälisiä yhdistekerroksia näiden esikäsittelyjen jälkeen. Komponentin puoleinen rajapinta ei poikkileikkausnäytteiden perusteella näyttäisi olevan luotettavuutta rajoittava tekijä, joten sen tarkastelu jätetään työssä tarkastelun ulkopuolelle.

Kuvassa 37 esitetään tutkitun transistorin rakenteesta kaaviokuva, johon on merkitty virran sekä elektronivuon kulkusuunnat. Elektronivuo kulkee kuvan mukaisesti komponenttiin lähdejuotteesta ja poistuu nielujuotteesta. Näin ollen lähdejuotteen ja piirilevyn välinen kontaktipinta tulee katodiksi, ja nielujuotteen ja piirilevyn välinen rajapinta puo-

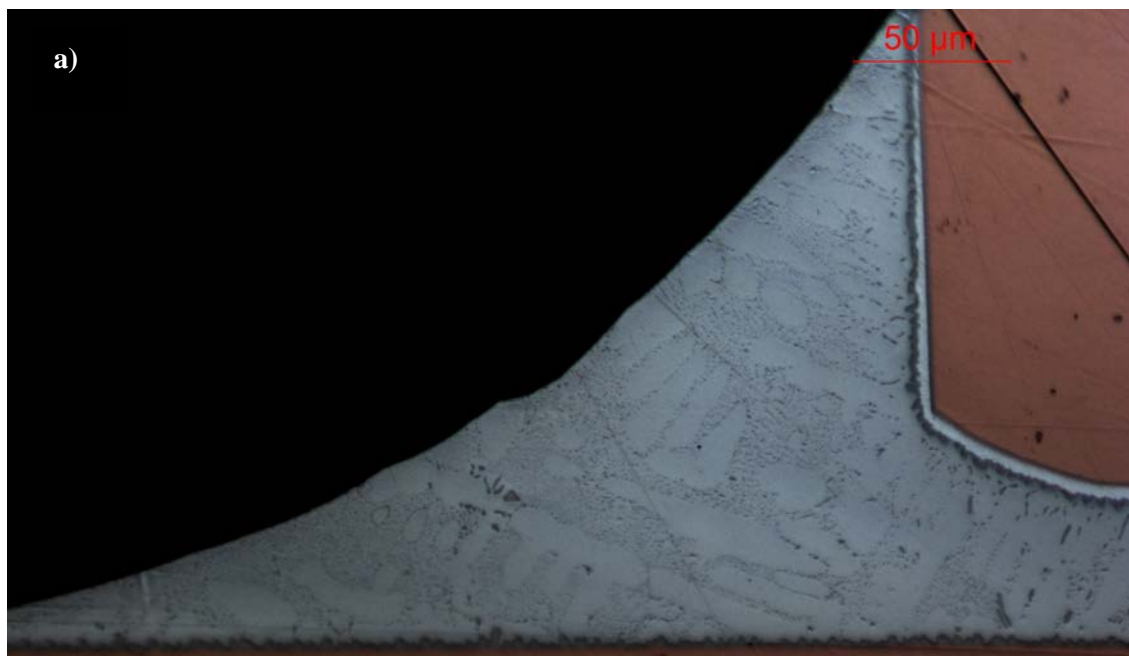
lestaan anodiksi. DC-virtarasitetuissa komponenteissa käytetyillä suurilla virrantiheyksillä elektronivuon kulkusuunnat ovat keskeisiä.



Kuva 37: Kaaviokuva tutkitun komponentin rakenteesta. Kuvaan on merkitty virran sekä elektronivuon kulkusuunnat.

6.1.1 Ei esikäsittelyä

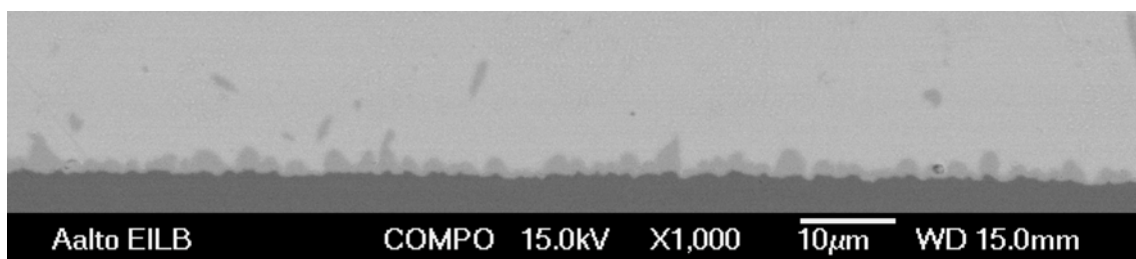
Esikäsittelemättömän näytteen juoteliitoksissa mikrorakenne havaittiin SnAgCu –juotteen tyypilliseksi jähmettymisrakenteeksi. Kuten kuvasta 38 nähdään, tinasellit ovat muodoltaan dendriittisiä. Lisäksi sellien väleissä eutektisella alueella on nähtävissä reflown aikana muodostuneita pieniä Cu_6Sn_5 ja Ag_3Sn –partikkeleita epäjärjestyksessä tinamatriisissa. Näytteen lähdeliitoksessa havaittiin Cu_6Sn_5 –partikkeleiden määrä bulkkijuotteessa hieman nieluliitosta suuremmaksi. Tämä johtunee lähdeliitoksen nielua huomattavasti suuremmasta pinta-alasta liukenevaa kuparia sekä osin myös lähdeliitoksen nikkelimetallonnista, joka lisää sulan kuparin liukoisuutta.





Kuva 38: *SnAgCu –juotteen tyypillinen jähmettymisrakenne esikäsitlemättömän näytteen (R1) a) nielu- ja b) lähdejuotteessa.*

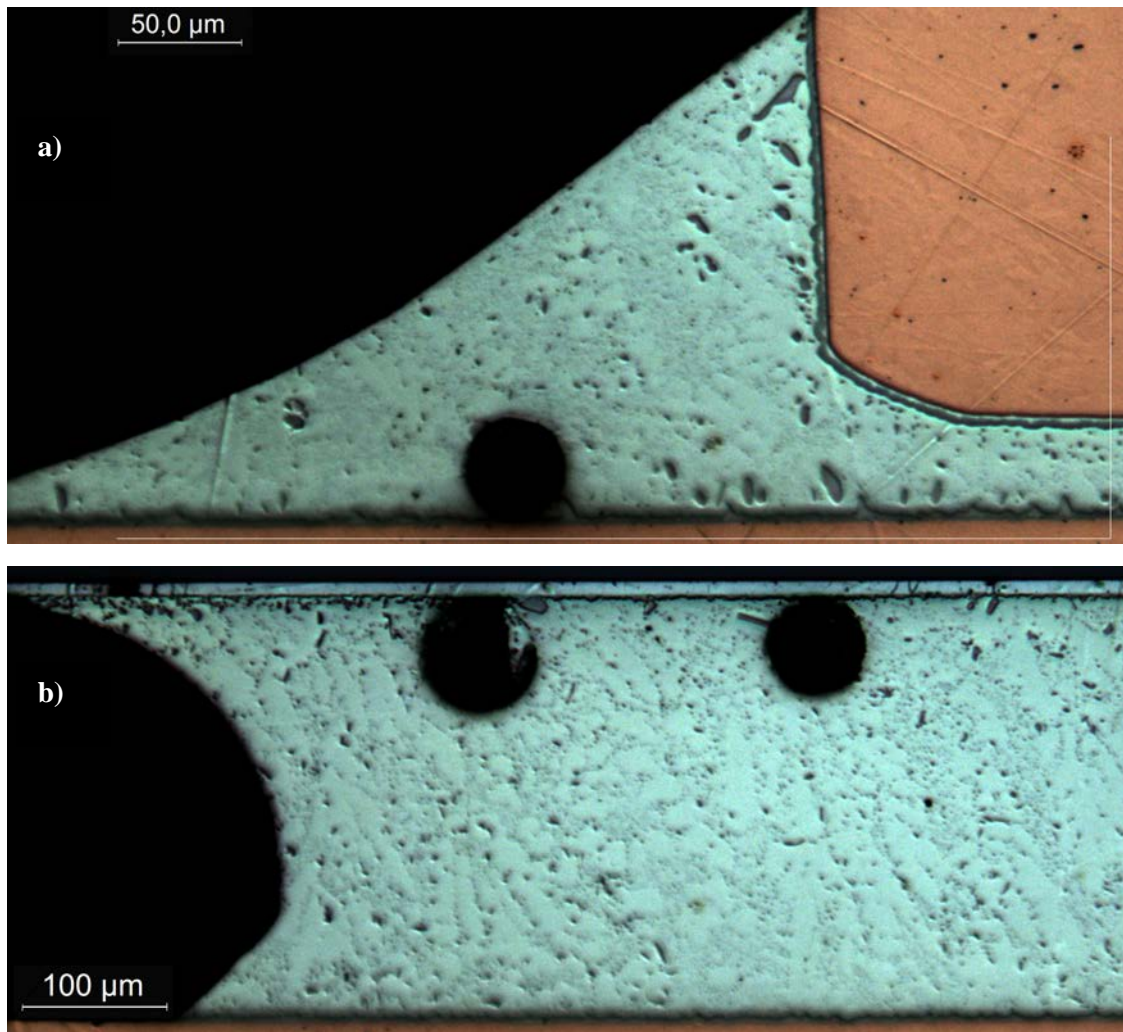
Kuvassa 39 on nielujuotteen piirilevynpuoleinen rajapinta. Kuvasta havaitaan, kuinka metallienvälinen yhdistekerros on muodoltaan hyvin epätasainen. Lisäksi vain yksi metallienvälinen yhdistekerros, Cu_6Sn_5 , on nähtävissä. Kuparialustan ja Cu_6Sn_5 –kerroksen välissä tiedetään olevan ohut Cu_3Sn –kerros, jota tällä mikroskoopin tarkkuudella ei vain havaita.



Kuva 39: *Elektronimikroskooppikuva esikäsitlemättömän näytteen (R1) nielujuotteen piirilevyn puoleiselta rajapinnalta.*

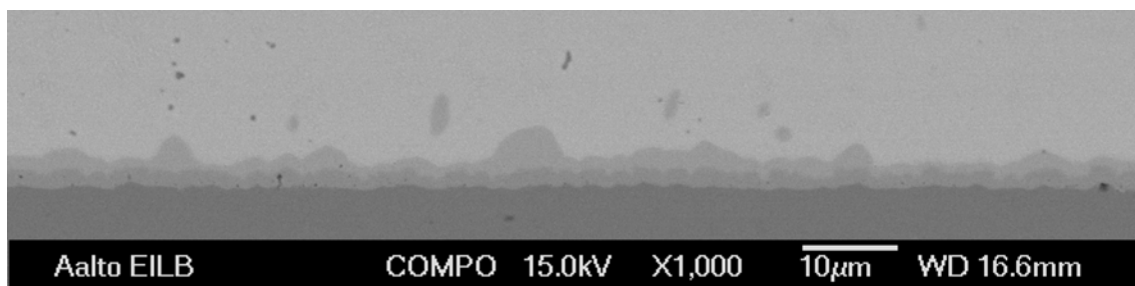
6.1.2 Hehkutus

Hehkutetussa näytteessä juotteen reflown jälkeinen sellimäinen rakenne on muuttunut muodoltaan selvästi pyöreämmäksi, ja eutektista rakennetta on vähemmän nähtävissä. Lisäksi juotematriisissa olevat metallienväliset yhdistefaasit ovat yhdistyneet suuremmiksi alueiksi. Tämä mikrorakenteen karkeutuminen hehkutuksen seurauksena on nähtävissä kuvasta 40. Kuten esikäsitlemättömässäkin näytteessä, lähdeliitoksessa (kuva 40 b) havaittiin nieluliitosta suurempi määrä Cu_6Sn_5 –erkaumia.



Kuva 40: Mikroskooppikuva hehkutetun näytteen (T1) mikrorakenteesta a) nielujuotteessa ja b) lähdejuotteessa.

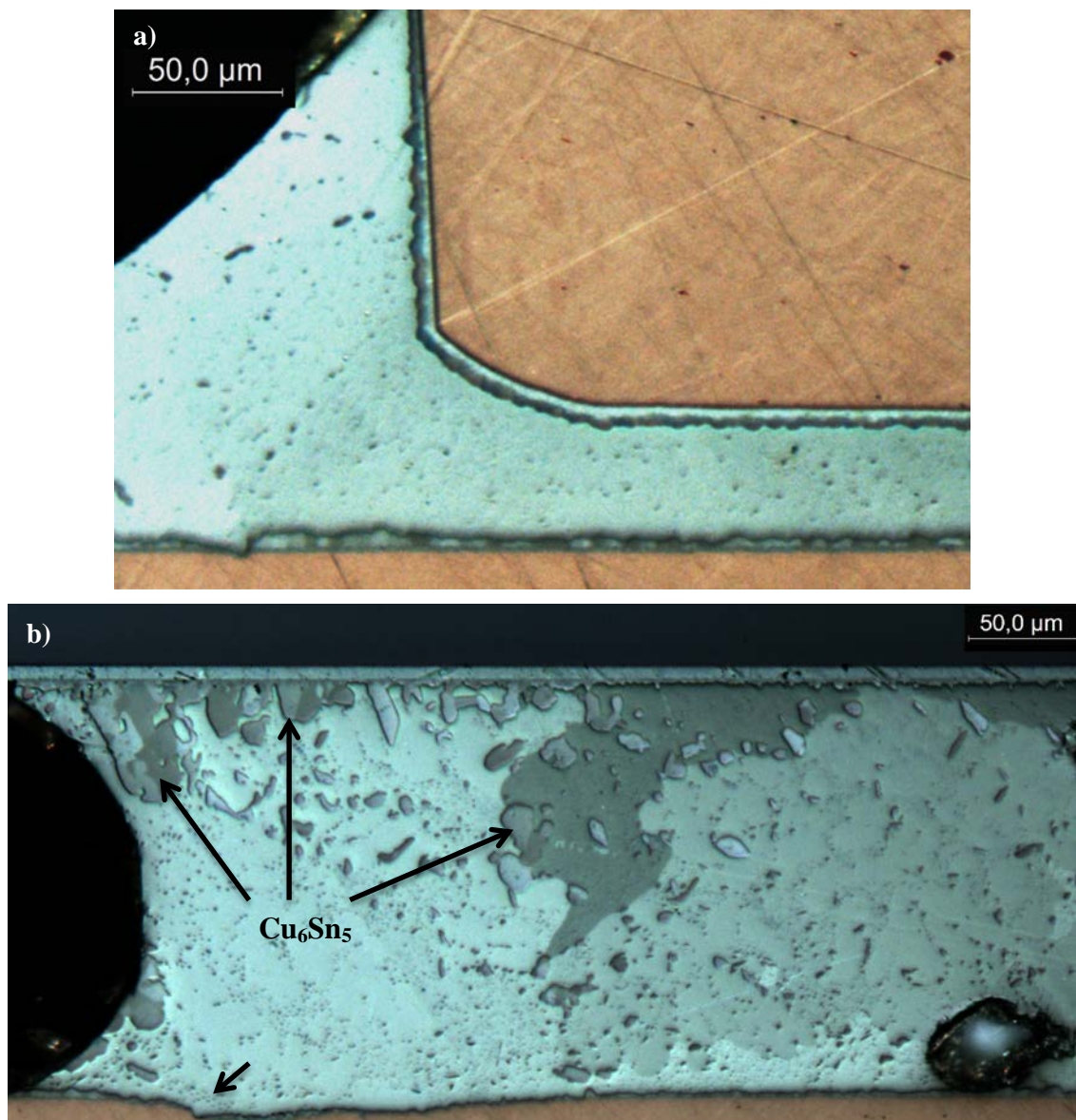
Nielujuotteen piirilevynpuoleinen rajapinta esitetään kuvassa 41. Metallenväliset yhdistekerrokset ovat muodoltaan pääosin esikäsitlemättömiä tasaisemmat – korkeampia kumpareita ja pitkiä lieskamaisia ulokkeita esiintyy kuitenkin paikoin. Cu_6Sn_5 -kerros on paksuuntunut ja Cu_3Sn -yhdistekerros on tullut näkyviin sen ja bulkkijuotteen väliin.



Kuva 41: Elektronimikroskooppikuva hehkutetun näytteen (T1) nielujuotteen piirilevyn puoleiselta rajapinnalta.

6.1.3 DC-virtarasitus

DC-virtarasitukselle altistetussa näytteessä nielujuotteen mikrorakenne poikkesi huomattavasti reflown jälkeisestä rakenteesta. DC-virran vaikutuksesta juotteen sellirakenne on suurimmaksi osaksi kadonnut ja mikrorakenne on hyvin hienojakoinen, kuten kuvasta 42 a) on nähtävissä. Kuvassa 42 b) esitetään lähdepuolen juote, jossa juotematriisin sellimäinen rakenne on yhä nähtävissä. Verrattuna esikäsittelemättömään juotteen, sellien muoto on kuitenkin pyöreämpi ja eutektista rakennetta on vähemmän nähtävissä, samoin kuin hehkutetussa näytteessä.



Kuva 42: Mikroskooppikuva DC-virtarasitetun näytteen (DC1) mikrorakenteesta a) nielujuotteessa ja b) lähdejuotteessa.

Muista esikäsittelyryhmistä poiketen DC-virtarasitetun näytteen lähdejuotteessa havaittiin poikkeuksellisen suuri määrä metallienvälisiä yhdiste-erkaumia. Tämä johtuu elektromigraation aiheuttamasta virran ahtautumisesta juotteessa. Kuten kuvassa 42 b) näkyy, Cu_6Sn_5 -partikkeleita on kerääntynyt erityisesti juotteen vasempaan ylänurkkaan, eli siihen kohtaan lähdejuotetta, jossa virran ahtautumista kappaleen 3.2.2 teorian mukaan odotettiin tapahtuvan. Lisäksi vasemmassa alareunassa näkyy kuparissa epäjatkuvuuskohta, josta kuparia on oletettavasti liuennut Cu_6Sn_5 -erkaumien muodostumiseen.

Nielujuotteen piirilevynpuoleinen rajapinta esitetään kuvassa 43. Metallienväliset yhdistekerrokset ovat muodoltaan selvästi tasaisemmat kuin käsittelemättömässä ja hehkutetussa juotteessa. Cu_6Sn_5 ja Cu_3Sn -kerrokset ovat pääosin suunnilleen saman paksuiset. Toisaalta monissa näytteissä oli nielujuotteessa havaittavissa virran ahtauman vaikutus metallienvälisen yhdistekerrosten paikalliseen kasvuun. Niissä Cu_6Sn_5 -kerroksen paksuus jopa lähes kolminkertaistuu joissain kohdissa juotetta Cu_3Sn -kerrokseen verrattuna. Kuvassa 43 esitetään tällainen näyte.



Kuva 43: DC-virtarasitetun näytteen (DC1) nielujuotteessa Cu_6Sn_5 -kerroksen paksuus vaihteli.

Eri esikäsittelyn kokoneiden näytteiden elektronimikroskoopilla otetuista kuvista mitattiin juoteliitosten metallienvälisen yhdistekerrosten keskimääräisiä paksuuksia. Mittauksiin otettiin kaksi näytettä kutakin esikäsittelytyyppiä, eli yhteensä kuusi piirilevyä. Kunkin juotteen IMC-kerrosten paksuus mitattiin useasta eri kohdasta ja näistä mitoista laskettiin keskiarvo. Kerrokset olivat aika epätasaisia ja mittapisteet määritettiin käsin, joten mittojen lukuarvoja voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina – virherajan arvioidaan olevan 10–20% mitatusta. Mittojen tarkkuus kuitenkin riittää tämän työn tarpeisiin. Mittaustuloksia vertaillaan taulukossa 5.

Taulukosta 5 nähdään, kuinka DC-virtarasitetuissa näytteissä nielujuotteen metallienvälinen yhdistekerros on kasvanut huomattavasti paksummaksi kuin lähdepuolella. Hehkutetuissa juotteissa paksuusero on pienempi, ja esikäsittelemättömissä merkityksellön. Lisäksi DC-virtarasitetuissa näytteissä nielujuotteen IMC-kerros on paksumpi kuin muissa esikäsittelyryhmissä. Nämä tulokset ovat yhtenevät aiempien tutkimusten [40, 49, 61] kanssa - elektromigraatio on kiihdyttänyt IMC-kerroksen kasvua DC-virtarasitetettujen kokoonpanojen nielujuotteessa.

DC-virtarasitetettujen näytteiden Cu_6Sn_5 ja Cu_3Sn -kerrosten suhteellisia osuuksia tarkastellessa huomataan, että nieluissa kerrokset ovat keskimäärin eri paksuiset. Kuten aiemmin kuvan 43 yhteydessä todettiin, Cu_6Sn_5 -kerros on paikoin virran ahtauman vaikutuksesta huomattavasti paksumpi kuin Cu_3Sn , vaikka pääosin Cu_6Sn_5 ja Cu_3Sn -

kerrokset ovat keskenään saman paksuiset. Hehkutetuissa näytteissä puolestaan nielun eri metallienvälisten yhdisteiden paksuusero ei ole yhtä suuri, vaikka niissäkin Cu_6Sn_5 on hieman paksumpi kuin Cu_3Sn . Lukuun ottamatta virranahtauman aiheuttamaa paikallista Cu_6Sn_5 -kerroksen kasvua, hehkutettujen ja DC-virtarasitettujen juotteiden Cu_3Sn -kerros on kasvanut esikäsitelyssä selvästi nopeammin kuin Cu_6Sn_5 .

Taulukko 5: IMC-kerrosten paksuus eri esikäsitelyryhmissä.

	Cu_6Sn_5 (μm)	Cu_3Sn (μm)	Koko IMC (μm)
Ei esikäsitelyä			
Nielu	2,1	-	2,1
Lähde	1,8	-	1,8
Hehkutus			
Nielu	2,2	1,6	3,8
Lähde	2,0	-	2,0
DC-virtarasitus			
Nielu	3,5	1,7	5,2
Lähde	1,6	-	1,6

Lähdeliitoksissa sen sijaan ei havaittu esikäsitelyissä tapahtuneen muutoksia IMC-kerroksissa. Kaikkien näytteiden lähdejuotteessa Cu_3Sn -kerros oli niin ohut, ettei sitä havaittu silmin tällä tutkimustarkkuudella ($0,2\mu\text{m}$), eikä Cu_6Sn_5 -kerroksenkaan havaittu esikäsitelyissä muuttuneen. Tämä nieluliitoksesta huomattavasti poikkeava kasvukäyttäytyminen johtunee erilaisesta komponentin puoleisesta metalloinnista nielu- ja lähdeliitoksessa: lähdekontaktilla metallointi on nikkeliä, kun nielussa se on hopeaa. Nikkelin tiedetään tyypillisesti vähentävän merkittävästi Cu_3Sn -kerroksen paksuutta [68].

6.2 Lämpösyklitestit

Kuten kappaleessa 5.2 kerrottiin, lämpösyklitestistä poistettiin kokoonpanoja 1300 syklin (noin 3 kuukautta) jälkeen kaksi kutakin esikäsitelytyyppiä. Poistettaviksi näytteiksi valittiin kunkin ryhmän sisällä ne, joiden vastusarvo oli noussut eniten. Muiden testikokoonpanojen osalta testiä jatkettiin vikaantumiseen tai korkeintaan 8000 syklin asti. Taulukossa 6 esitellään lämpösyklitestin tulokset esikäsitelyryhmittäin, sekä tulosten keskiarvot vikaantuneista näytteistä. Testin päättyessä vielä toiminnassa olevien kokoonpanojen vikaantumistulokseksi merkittiin suurempi kuin 8000 sykliä. Vikaantuneista sekä 1300 syklin jälkeen poistetuista kokoonpanoista valmistettiin poikkileikkausnäytteet, joita tutkittiin valomikroskoopilla myös käyttäen polarisoitua valoa uudelleenkiteytymisen saamiseksi näkyviin.

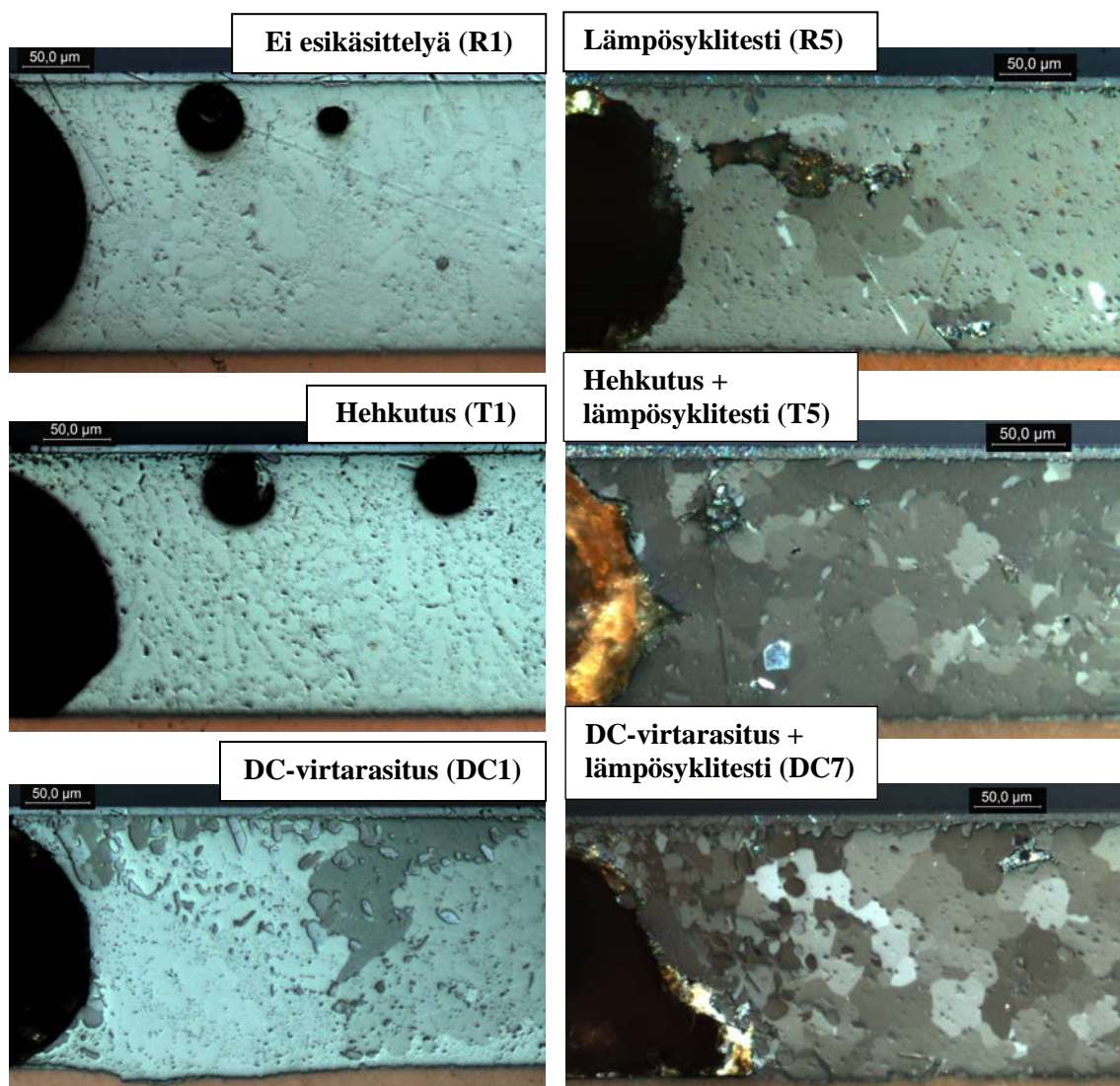
Taulukosta 6 havaitaan, että esikäsittelemättömien ja hehkutettujen testikokoonpanojen vikaantumisnopeudessa ei ole merkittävää eroa ja keskihajonta on molemmissa pieni. Esikäsittelemättömistä näytteistä kaksi ei ehtinyt täysin vikaantua testin aikana, hehkutetuista yksi. DC-virtarasitetut näytteet sen sijaan osoittautuivat kaikista kestä-

vimmiksi; yksikään testikappale ei vikaantunut yli vuoden kestäneessä lämpösyklitestissä. Edes niiden vastusarvot eivät olleet nousseet testin aikana.

Taulukko 6: *Lämpösykliteistiin laitettujen kokoonpanojen tulokset.*

	Levyn tunniste	1300 syklin jälkeen poistettut	Sykliä vikaantumiseen (100 syklin tarkkuudella)
Ei esikäsittelyä			
	R2	x	
	R3		> 8000
	R4		7400
	R5	x	
	R6		6300
	R7		> 8000
Keskiarvo			6850
Keskihajonta			778 (11 %)
Hehkutus			
	T2		7000
	T3	x	
	T4		7000
	T5	x	
	T6		> 8000
	T7		7200
Keskiarvo			7067
Keskihajonta			115 (2 %)
DC-virtarasitus			
	DC2	x	
	DC3		> 8000
	DC4		> 8000
	DC5		> 8000
	DC6		> 8000
	DC7	x	

Poikkileikkausnäytteitä tarkastelemalla havaittiin, että kaikkien näytteiden juotteissa oli tapahtunut muutoksia mikrorakenteessa lämpösyklauksen aikana. DC-virtarasitetuissa näytteissä todettiin sekä nielu- että lähdeliitoksen mikrorakenne selvästi erilaiseksi kuin esikäsittelemättömissä ja hehkutetuissa kokoonpanoissa. Eri esikäsitteilyryhmissä tapahtuneet mikrorakenteen muutokset olivat samansuuntaiset näytteen nielu- ja lähdeliitoksessa. Vikaantuneissa näytteissä oli murtuma lähdejuotteessa, ja nielu-liitoksesta löytyi ainoastaan pieniä säröjä. Siten nielu-liitosta ei käsitellä tässä sen enempää. Kuvassa 44 vertaillaan eri esikäsitteilyn kokoneiden näytteiden lähdeliitosta pelkän esikäsitteilyn jälkeen ja 1300 sykliä kestäneen lämpösyklitestin jälkeen.

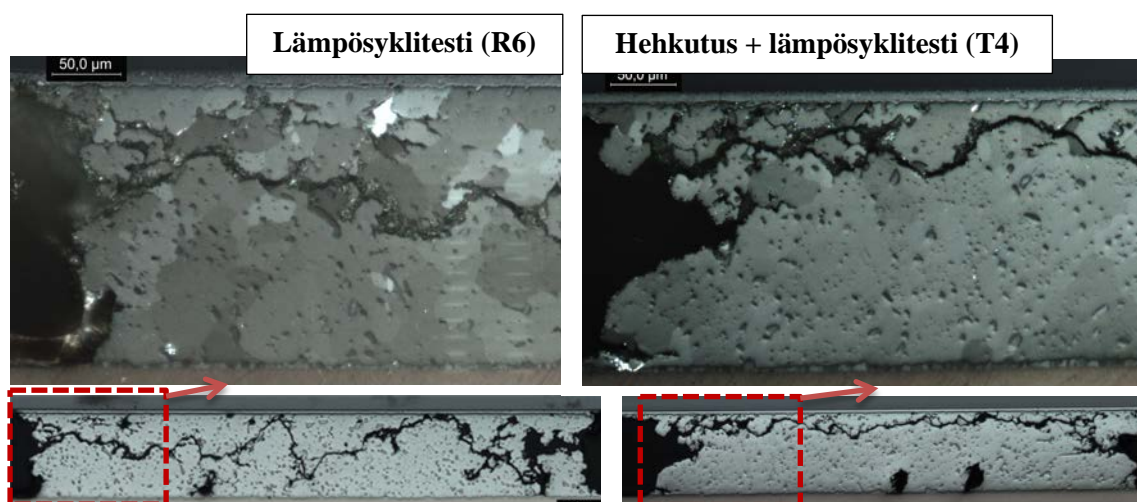


Kuva 44: Lähdepuolen juoteliitoksen vertailua eri esikäsitteilyryhmissä. Ylhäällä esikäsittelemättömän, keskellä hehkutettu ja alhaalla DC-virtarasitetun juote ennen ja jälkeen 1300 syklin lämpösyklitestin.

Kuten kuvasta 44 nähdään, esikäsittelemättömän juotteen mikrorakenne muuttui huomattavasti lämpösyklauksessa: dendriittinen sellirakenne on muuttunut suurelta osin tasa-akseliseksi rakenteeksi, jossa tinasellejä ja eutektisia alueita ei enää erota. Juotteessa olevat metallienväliset yhdistepartikkelit ovat kerääntyneet suuremmiksi erkaumiksi ja jotkin alueet ovat uudelleen kiteytyneet. Hehkutetussa näytteessä tapahtui samanlaisia muutoksia kuin esikäsittelemättömässä, mutta muutokset ovat edenneet pidemmälle: juotteen sellirakenne on kokonaan kadonnut, IMC –erkaumat ovat suurentuneet ja suuri osa liitoksesta on uudelleen kiteytynyt. Myös DC-virtarasitetussa näytteessä juotematriisi sekä IMC-erkaumat ovat karkeutuneet edelleen alkuperäisestä ja suuri osa liitoksesta on uudelleen kiteytynyt. DC-virtarasitetun näytteen lämpösyklauksen jälkeinen mikrorakenne poikkeaa kuitenkin selvästi esikäsittelemättömästä ja hehkutetuista. Juotteen rakenne on edelleen muita hienojakoisempi ja metallienvälisen yhdistepartikkelien koko näyttäisi olevan keskimäärin pienempi – ilmeisesti IMC-partikkelit

eivät ole päässeet yhdistymään suuremmiksi yhtä nopeasti kuin muissa esikäsittelytyypeissä. Lisäksi juotteessa on virran ahtautumisen aiheuttamana suuria Cu_6Sn_5 –erkaumia liitoksen vasemmassa reunassa.

Kuvassa 45 tarkastellaan vielä lämpösyklitestissä vikaantuneita liitoksia. Kuvasta nähdään, kuinka sekä esikäsitlemättömässä että hehkutetussa juotteessa mikrorakenne on jatkanut muuttumista samaan suuntaan 1300 syklin tilanteesta. Molemmissa sellirakenne on kokonaan kadonnut, IMC –erkaumat ovat yhdistyneet vielä suuremmiksi ja liitos on kauttaaltaan uudelleen kiteytynyt. Hehkutetussa liitoksessa tosin rakenne näyttäisi olevan hieman karkeutuneempi. Kummassakin näytteessä liitos on murtunut bulkkijuotteesta lämpösyklaukselle tyypillisesti raerajoja pitkin, mutta murtopolut ovat hieman erilaiset. Hehkutetussa näytteessä murtuma kulkee tasaisemmin lähellä komponentin puoleista rajapintaa, kun käsitlemättömässä murtuma etenee epätasaisemmin vaihtaen usein kulkusuuntaa. Tämä saattaa johtua juotteiden erilaisesta alkuperäisestä mikrorakenteesta: esikäsitlemättömän näytteen mikrorakenne on lähtötilanteeltaan hehkutettua heterogeenisempi, joten murtopolku seurannee herkemmin rakenteessa epätasaisesti sijaitsevia heikkoja kohtia.



Kuva 45: Lämpösyklitestissä vikaantuneet liitokset polarisoitua valoa käyttäen. Vasemmalla 6300 syklin jälkeen vikaantunut esikäsitlemätön liitos ja oikealla hehkutettu 7000 syklin jälkeen vikaantunut liitos. Kuvien alla koko vikaantunut juote.

6.3 Pudotustesti

Taulukossa 7 listataan tärytystestin tulokset esikäsittelyryhmittäin, sekä ryhmien keskiarvot. Kaikista testikappaleista valmistettiin poikkileikkausnäyte mikroskoopilla tarkasteluun. Eri esikäsittelyryhmien suurimmalla pudotusmäärällä vikaantunut näyte tutkittiin lisäksi elektronimikroskoopilla. Kunkin testikappaleen poikkileikkausnäytteessä näkyneet vauriot on listattu taulukon viimeiseen sarakkeeseen, jossa murtuman sijainti ilmaistaan kirjainlyhenteillä D (nielu) ja S (lähde). Merkintä ”o” ilmaisee murtuman olleen osittainen, eikä siis kulje läpi koko liitoksen.

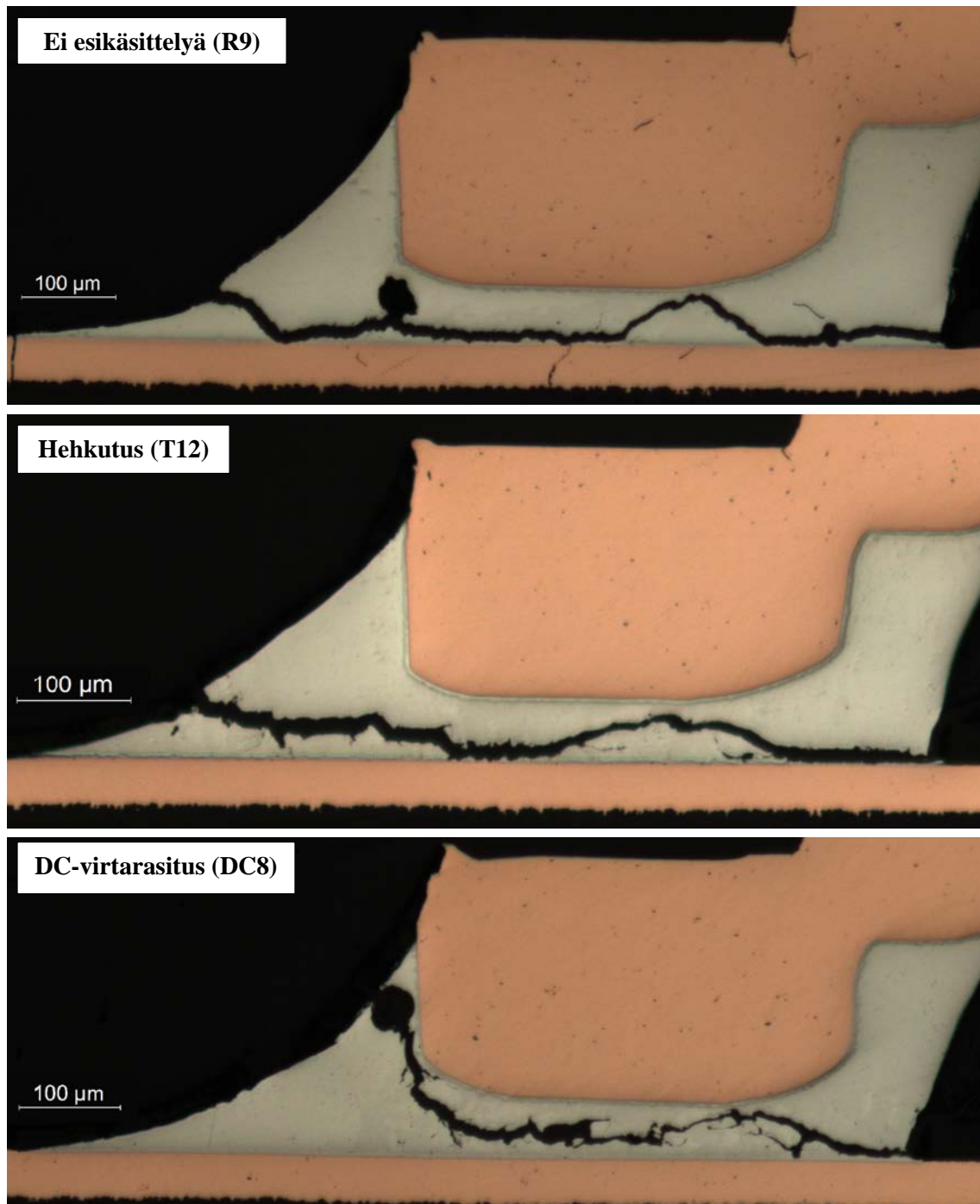
Taulukko 7: Pudotustestiin altistettujen kokoonpanot esikäsittelyryhmittäin sekä testin tulos.

	Levyn tunniste	Pudotusta vikaantumiseen	Murtuman sijainti
Ei esikäsittelyä			
	R8	573	D, komponentin jalka
	R9	noin 4569	D, So
Keskiarvo		2571	
Keskihajonta		2826 (110 %)	
Hehkutus			
	T8	445	D
	T9	523	(Ei näytettä)
	T10	797	D
	T11	1091	D
	T12	2891	D, So
Keskiarvo		1149	
Keskihajonta		1006 (88 %)	
DC-virtarasitus			
	DC8	561	D
	DC9	880	D
	DC10	1255	D, So
	DC11	1371	D
	DC12	1477	D
Keskiarvo		1109	
Keskihajonta		380 (34 %)	

Testikappaleista hylättiin sellaiset, joiden poikkileikkausnäytteessä ei näkynyt vauriota. Tällöin virheilmoitus on todennäköisesti tullut jostakin viasta kytkennän johtimisesta tai niiden liitoksissa piirilevyyn. Kyseessä on saattanut olla myös komponenttilevyn tai komponentin vaurioituminen. Muunlainen vikaantumisen kuin juoteliitoksen vikaantuminen ei tässä työssä ole kiinnostuksen kohteena, joten näytteet hylätään, eikä niitä ole merkitty taulukkoon. Yhden testikokoonpanon (R9) pudotustesti kesti poikkeuksellisen pitkään, joten komponentista tehtiin näyte kesken testin. Näytteessä havaittiin murtuma nielu-juotteessa. Kuten taulukosta 7 havaitaan, esikäsitlemättömistä näytteistä suurin osa hylättiin – juoteliitos ei niissä ilmeisesti ollut komponentin heikoin kohta. Vain kaksi näytettä oli vikaantunut juoteliitoksesta, ja niiden välinen hajonta on erittäin suuri. Siten niiden tuloksia ei voida käyttää luotettavuuden arviointiin. Hehkutetuissa ja DC-virtarasitetuissa näytteissä sen sijaan hajonta näyttäisi olevan pienempi kuin käsitlemättömissä, ja DC-virtarasitetuissa hajonta on vain alle puolet hehkutettujen testikappaleiden hajonnasta. Hehkutettujen ja DC-virtarasitetettujen näytteiden luotettavuuden välillä puolestaan ei ilmennyt merkittävää eroa.

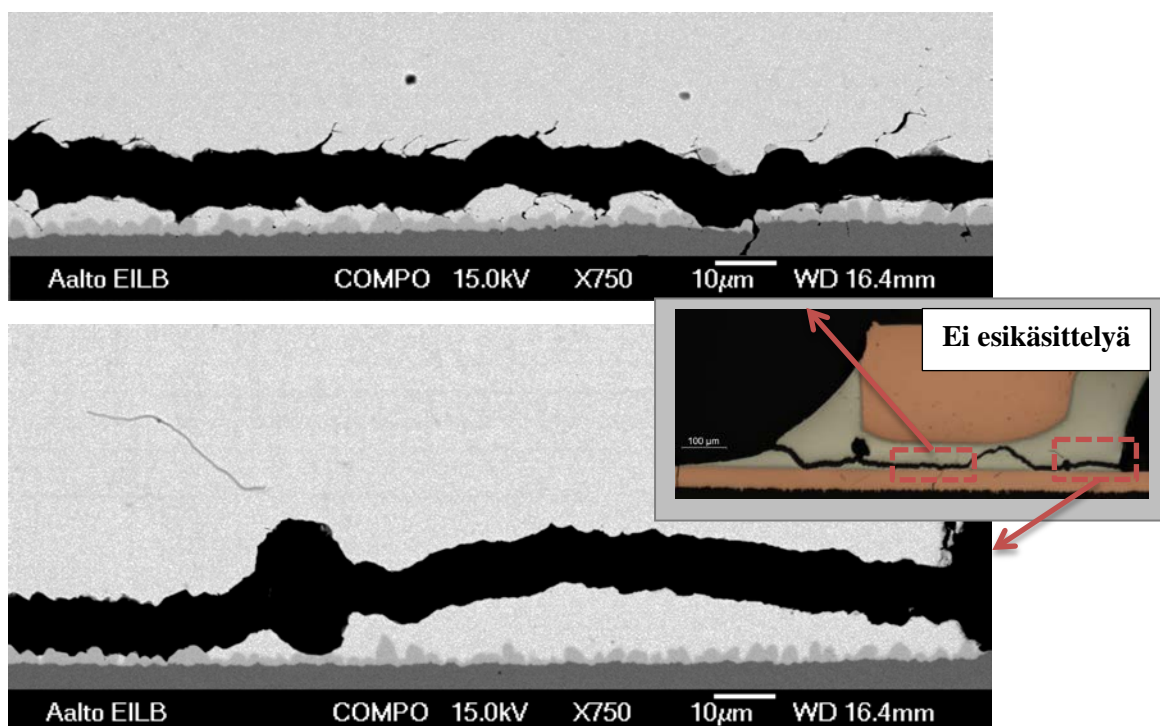
Poikkileikkausnäytteitä tarkastelemalla havaittiin, että kaikissa vikaantuneissa näytteissä oli murtuma nielupuolen juotteessa. Lähdeliitoksissa puolestaan oli ainoastaan pari osittaista murtumaa poikkeuksellisen suurella iskumäärällä vikaantuneissa näytteis-

sä ja muutama pieni murtuman alku muissa näytteissä. Todennäköisesti tämä johtuu komponentin geometriasta; nielu- ja lähde-juotenystyt ovat erimuotoiset ja suurikokoisen lähdeliitos on keskellä komponenttia eniten suojassa piirilevyn taipumiselta. Lähdeliitosta ei siten tarkastella tässä sen enempää. Kuvassa 46 vertaillaan eri esikäsittelyryhmissä ilmennyttä tyypillistä murtumaa nielujuotteissa.

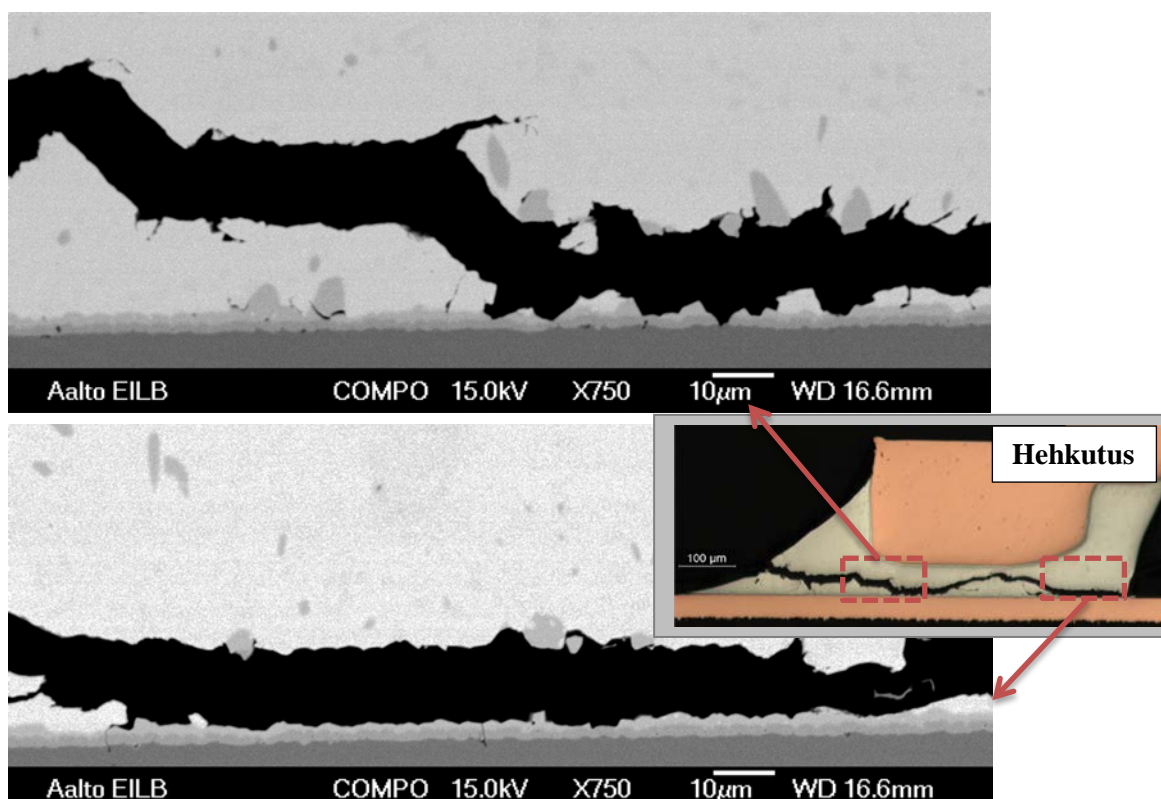


Kuva 46: Murtumapolku nielujuotteessa eri esikäsittelyryhmissä.

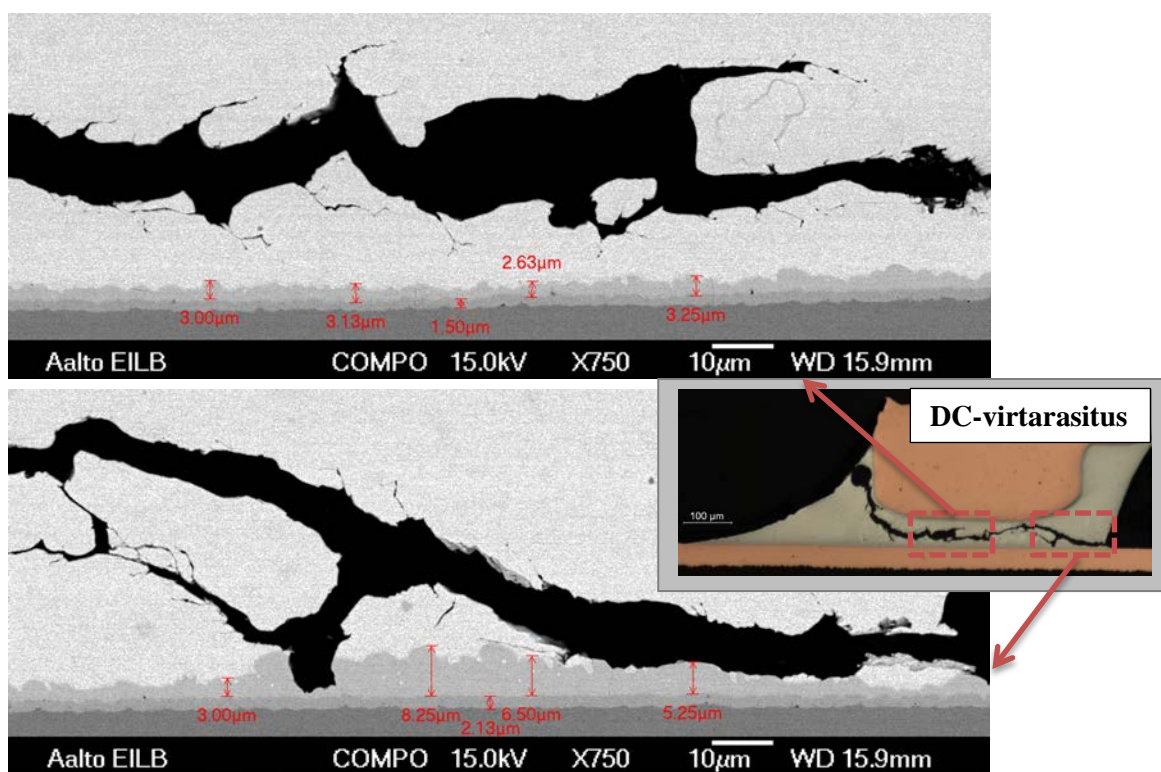
Kuvista havaitaan, kuinka esikäsittelemättömässä ja hehkutetussa näytteessä murtuma näyttäisi kulkevan enemmän metallienvälisissä yhdistekerroksissa kuin bulkkijuotteessa, kun DC-virtakäsittelyssä murtuma etenee selvästi bulkkijuotteessa. Kuten kappaleessa 2.4 pudotustestin yhteydessä todettiin, pudotustestin nopeassa iskukuormituksessa juotteen muodonmuutosnopeus on korkea. Tämä lujittaa juotetta, jolloin liitosalueen heikoimmaksi rakenteeksi jää metallienvälinen yhdistekerros. Mekaanisen iskun aikaansaama särö eteneekin tyypillisesti IMC-kerroksissa tai juotteen ja IMC-kerroksen rajapinnalla. DC-virtarasitetun näytteen murtumareitti on tästä poikkeava; ilmeisesti juotteen kestävyys on heikentynyt. Kyseisen DC-virtarasitetun näytteen elinikä oli noin puolet esikäsittelemättömän ja hehkutetun näytteen eliniästä, mutta se edusti silti esikäsitteilyryhmänsä tyypillistä näytettä. Tosin komponentin ulkopuolella oleva huokonen on todennäköisesti vaikuttanut murtuman reittiin, sillä muissa DC-virtarasitetuissa näytteissä murtuma ei ole siinä kohdassa kulkenut yhtä läheltä komponenttia vaan pysynyt hieman keskemällä bulkkijuotetta. Kuvissa 47, 48 ja 49 tarkastellaan vielä samoja näytteitä elektronimikroskoopilla, jotta nähdään tarkalleen kulkevatko murtumat keskelä metallienvälistä yhdistekerrosta, bulkkijuotteen ja IMC-kerroksen rajapinnalla vai bulkissa. Kuvassa 47 on esikäsittelemätön, kuvassa 48 hehkutettu ja kuvassa 49 DC-virtarasitettu näyte.



Kuva 47: Esikäsittelemättömän (R9) näytteen murtuman reitti nielujuotteessa.



Kuva 48: *Hehkutetun (T12) näytteen murtuman reitti nielujuotteessa.*



Kuva 49: *DC-virtarasitetun (DC8) näytteen murtuman reitti nielujuotteessa.*

Edellä esitetyistä elektronimikroskooppikuvista havaitaan, että eri esikäsittelyn koneilla näytteillä näyttäisi olevan eroja vikaantumisessa. Esikäsittelemättömässä näytteessä murtuma kulkee enimmäkseen juotteessa lähellä juotteen ja IMC-kerroksen rajapintaa, ja vain satunnaisesti murtuma on edennyt hyvin pienessä kohtaa IMC-kerroksen rajapinnalla. Hehkuttamalla esivanhennetussa näytteessä sen sijaan murtuma etenee jo puoliksi juotteen ja Cu_6Sn_5 :n välistä rajapintaa pitkin. DC-virtarasetetussa näytteessä puolestaan murtuma kulkee lähes ainoastaan bulkkijuotteessa kaukana rajapinnoista. Vain parissa kohdassa murtuma etenee pienen pätkän metallienvälisen yhdistekerroksen ja bulkin välisellä rajapinnalla. Näissä kohdissa IMC-kerros on virran ahtautumisen vaikutuksesta keskimääräistä paksumpi, mikä on ilmeisesti vaikuttanut murtuman reittiin.

6.4 Tärytystesti

Taulukossa 8 esitetään tärytystestin tulokset esikäsitteilyryhmittäin, sekä ryhmien keskiarvo ja keskihajonta. Kaikista testikappaleista valmistettiin poikkileikkausnäyte, joita tutkittiin valomikroskoopilla. Lisäksi suurimmalla pudotusmäärällä vikaantuneita näytteitä tutkittiin mikroskoopin polarisoidulla valolla sekä elektronimikroskoopilla. Samoin kuin pudotustestissä, tärytystestatuista testikokoonpanoista hylättiin sellaiset, joissa ei näkynyt vauriota juoteliitoksissa. Hylätyksi päätyi vain yksi näyte. Kunkin näytteen vauriot on listattu taulukon viimeiseen sarakkeeseen, jossa murtuman sijainti ilmaistaan kirjainlyhenteillä D (nielu) ja S (lähde). Merkintä ”o” ilmaisee murtuman olleen osittainen, eikä siis kulje koko liitoksen läpi.

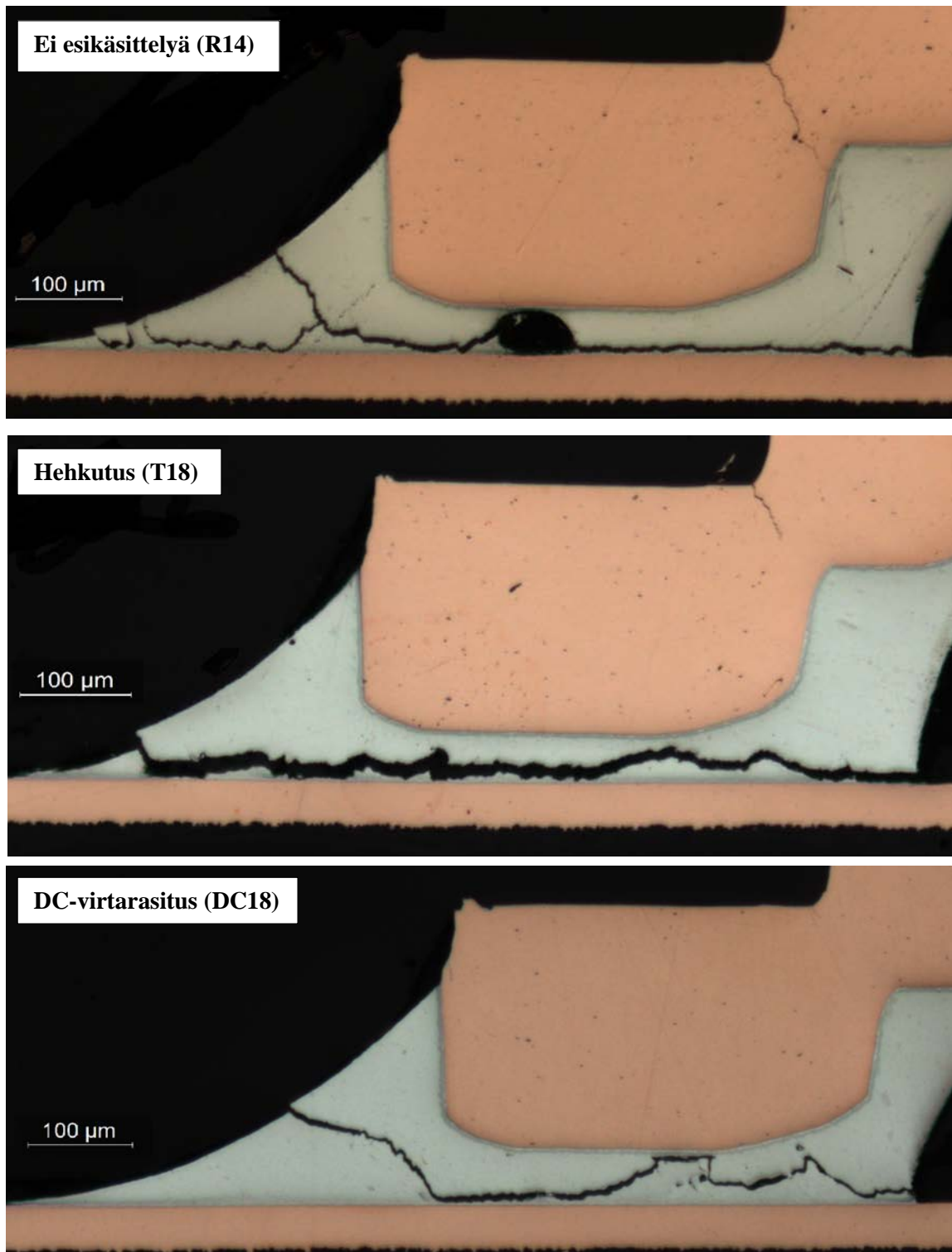
Taulukosta 8 havaitaan, että esikäsittelemättömien, hehkutettujen ja DC-virtarasetettujen näytteiden keskimääräisen vikaantumisnopeuden välillä ei ilmene merkittävää eroa. Lisäksi tulosten keskihajonta on kaikissa esikäsitteilyryhmissä huomattavan suuri. Esikäsitteilyillä ei siis näytä hajontaan nähden olevan vaikutusta juoteliitosten luotettavuuteen tärytyksessä.

Poikkileikkausnäytteitä tarkastelemalla havaittiin kaikissa vikaantuneissa näytteissä murtuma nielujuotteessa. Lähdejuotteet olivat tärytyksessä selvinneet lähes vauriotta. Yhtä näytettä lukuun ottamatta niistä löytyi ainoastaan pieniä säröjä, eikä niissä ole eri esikäsitteilytyyppien välillä havaittavissa eroavaisuuksia. Lähdeliitoksia ei siis käsitellä tässä enempää. Kuvassa 50 vertaillaan eri esikäsitteilyryhmien suurimmalla syklimäärällä vikaantuneen näytteen nieluliitoksen murtumaa. Näytteet edustavat myös esikäsitteilyryhmänsä tyyppillistä murtumaa, ja niiden vikaantumisnopeus oli keskenään samaa luokkaa.

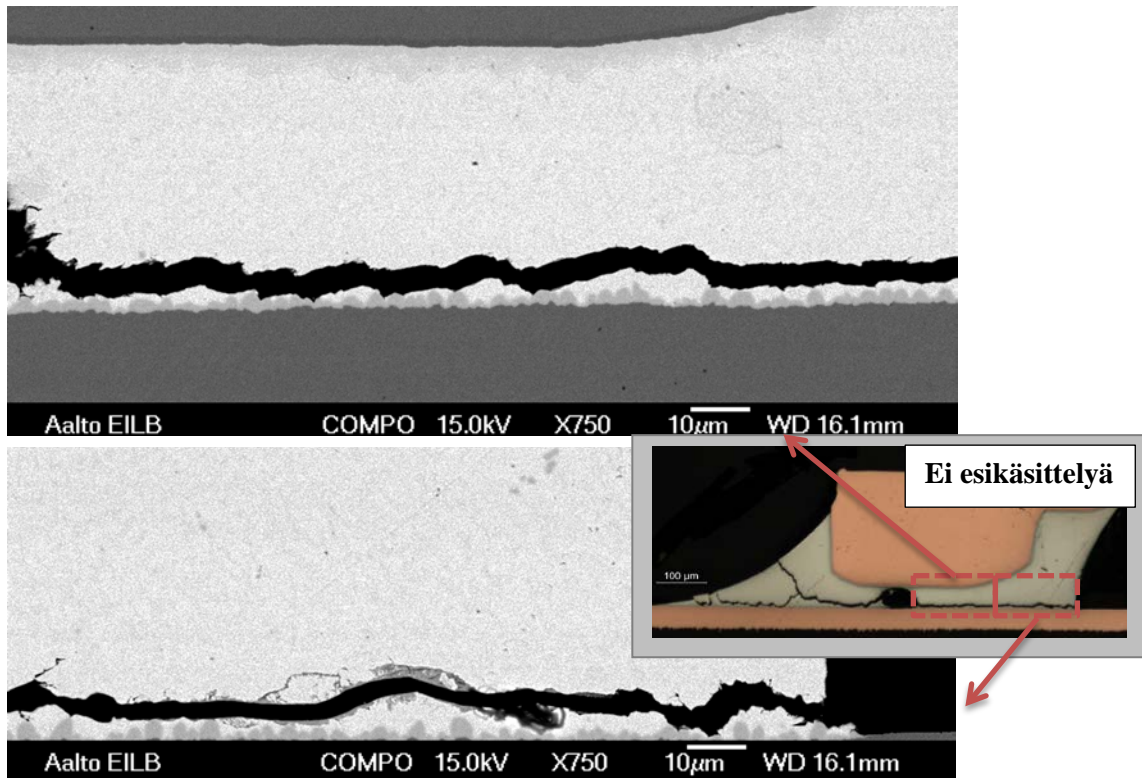
Taulukko 8: *Tärytystestatut piirilevyt esikäsitteilyryhmittäin sekä testin tulos.*

	Levyn tunniste	Sykliä (30s) vikaantumiseen	Murtuman sijainti
Ei esikäsitteilyä			
	R10	48	D
	R11	58	D
	R12	66	D, komponentin jalka
	R13	198	D
	R14	218	D, komponentin jalka
Keskiarvo		118	
Keskihajonta		83 (70 %)	
Hehkutus			
	T13	24	D
	T14	40	D, So
	T15	40	D
	T16	58	D
	T17	82	D
	T18	232	D
Keskiarvo		79	
Keskihajonta		77 (97 %)	
DC-virtarasitus			
	DC13	22	D
	DC14	28	D
	DC15	38	D
	DC16	100	D
	DC17	140	D
	DC18	224	D
Keskiarvo		92	
Keskihajonta		80 (87 %)	

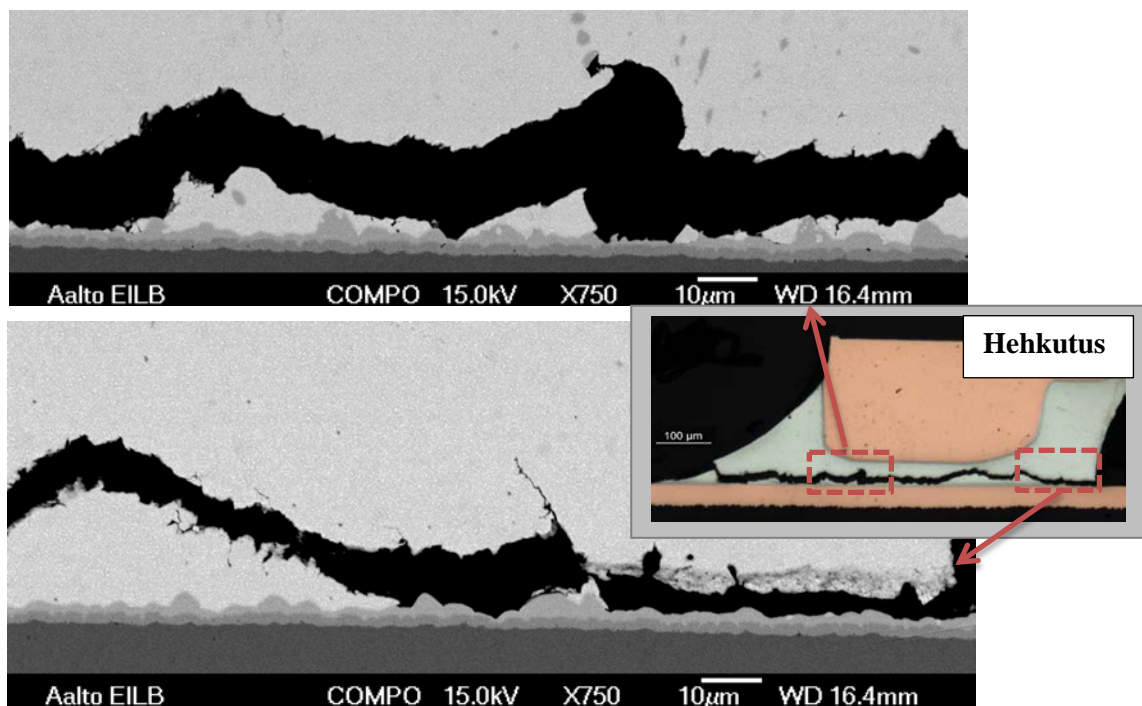
Esikäsittelemättömissä näytteissä murtuma näyttää kulkevan lähellä metallienvälisiä yhdistekerroksia, kun taas termisesti käsitellyissä murtuma irtautuu hieman rajapinnasta. DC-virtarasitetuissa murtuman reitti on epäsäännönmukaisin, ja kulkee keskellä bulkkijuotetta. Kuvissa 51, 52 ja 53 tarkastellaan vielä samoja näytteitä elektronimikroskoopilla, jolloin nähdään missä murtumat tarkalleen kulkevat: keskeltä metallienvälisiä yhdistekerroksia, bulkkijuotteen ja IMC-kerrosten rajapinnalla vai bulkissa. Kuvassa 51 on esikäsittelemätön, kuvassa 52 hehkutettu ja kuvassa 53 DC-virtarasitettu näyte.



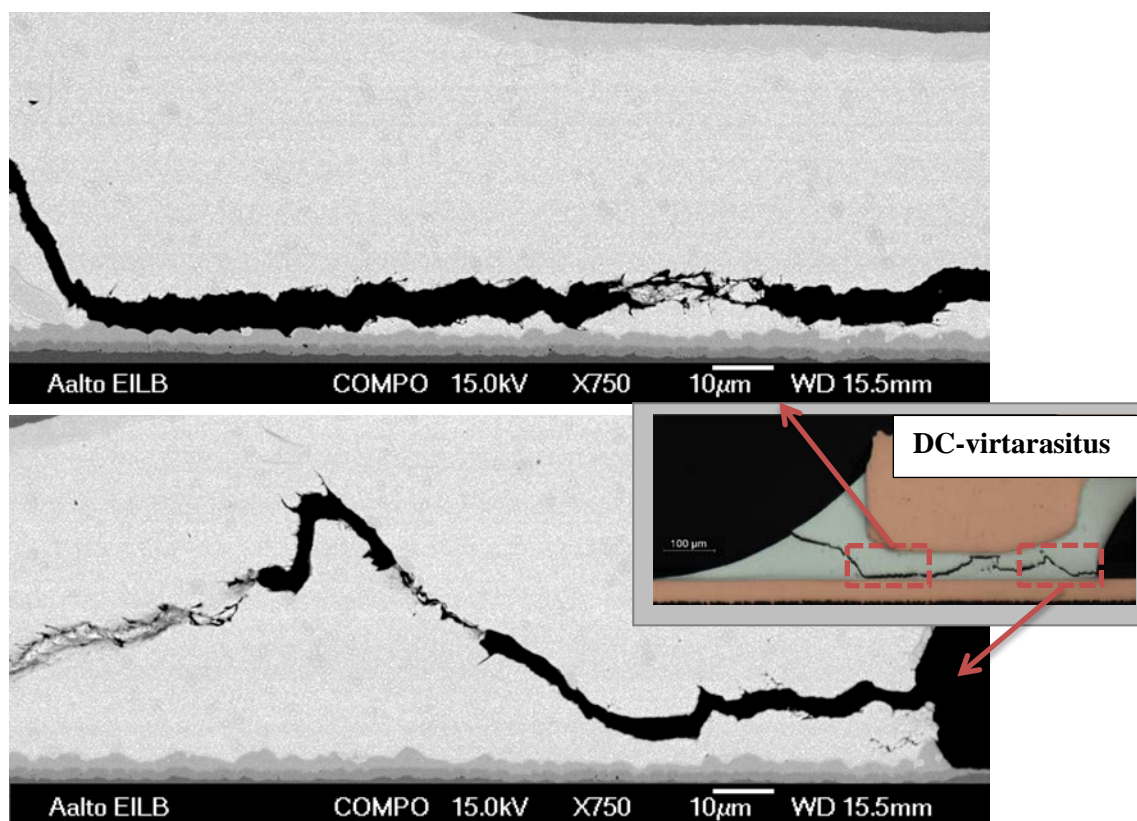
Kuva 50: Murtumapolku nielujuotteessa eri esikäsitteilyryhmissä.



Kuva 51: Murtuman kulkureitti nielujuotteessa esikäsittelemättömässä (R14) näytteessä.



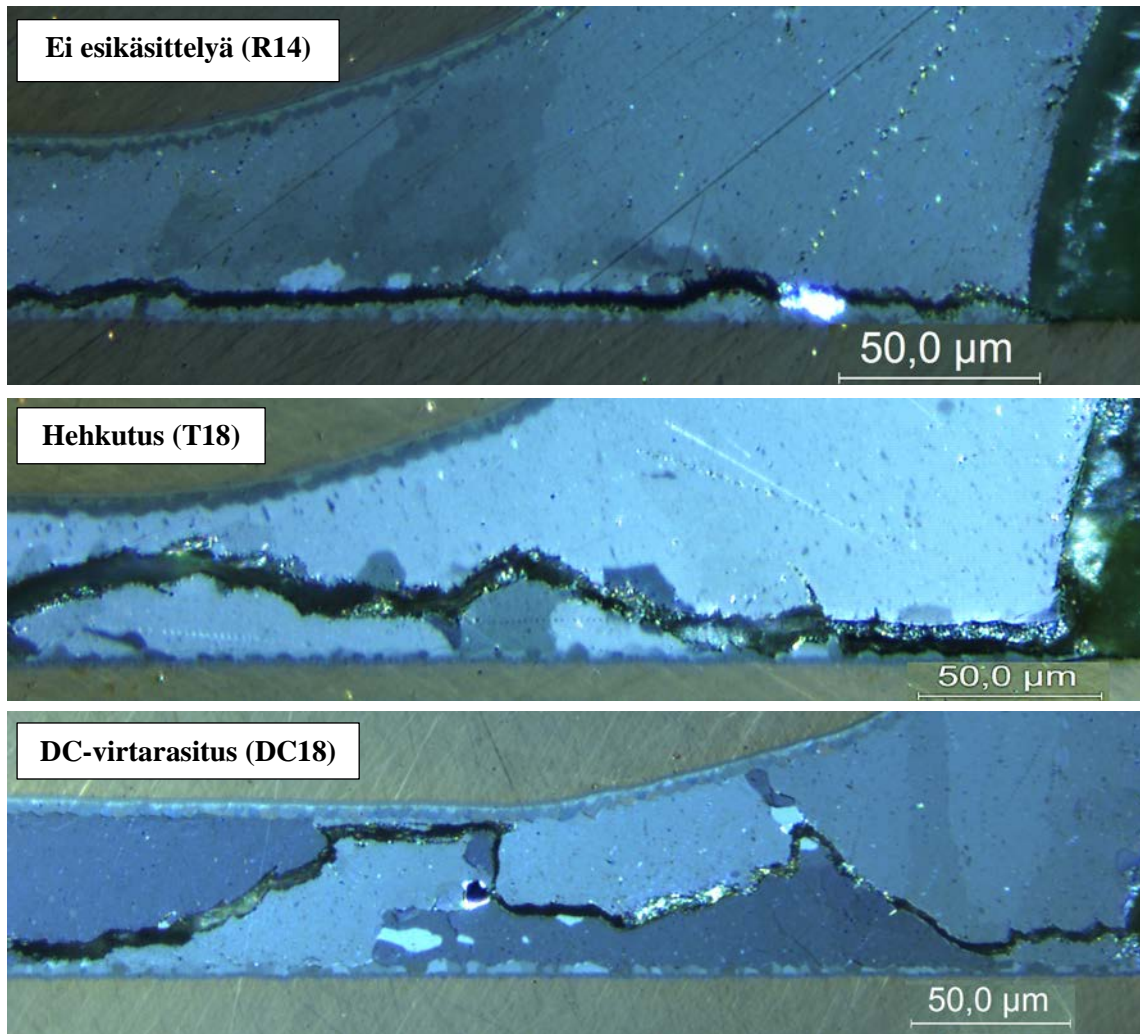
Kuva 52: Murtuman kulkureitti nielujuotteessa termisesti esivanhennetussa (T18) näytteessä.



Kuva 53: Murtuman kulkureitti nielujuotteessa DC-virtasyötetyssä (DC18) näytteessä.

Kuvasta 51 havaitaan, että esikäsittelmättömän näytteen murtuma kulkeekin bulkkijuotteessa ja vain hyvin lähellä metallienvälisen yhdistekerroksen ja bulkin rajapintaa. Hehkutetussa näytteessä kuvassa 52 murtuma kulkee paikoin tiiviisti IMC-kerroksen ja bulkin rajapintaa seuraten ja toisaalla bulkkijuotteessa. DC-virtarasisitetussa näytteessä kuvassa 53 puolestaan murtuma on bulkissa kaukana rajapinnoista ja kulkee vain pari pienen pientä pätkää IMC-kerroksen ja bulkin rajapinnalla. Esikäsittely näyttää siis vaikuttavan juotteen vikaantumistapaan tärytyksessä.

Nielupuolen juotteita tarkasteltiin vielä valomikroskoopilla optisesti polarisoitua valoa käyttäen. Kuten kuvasta 54 nähdään, kiderakenne on kaikissa näytteissä muuttunut hieman. Juotteissa on luultavasti tapahtunut tärytyksessä mekaanista muutosta, joka on saanut sellirakenteen osia kiertymään erillisiksi suuren kulman rajaamiksi kiteiksi. Esikäsittelmättömässä näytteessä havaitaan uusia kiteitä, jotka ovat luultavasti tulleet vasta murtuman muodostumisessa, eikä niillä siten ollut merkitystä murtuman etenemiselle. Hehkutetussa näytteessäkin näkyy kiteitä, mutta on epäselvää olivatko ne tulleet ennen vai jälkeen murtuman. DC-virtarasisitetussa näytteessä puolestaan näkyy suuria jähmettymisrakenteen kiteitä sekä pieniä tärytystestin aikana muodostuneita alueita. Murtumat seuraavat selvästi kiteiden raerajoja, mutta esikäsittelyn yhteyttä murtuman kulkureittiin ei ole havaittavissa.



Kuva 54: Nielupuolen juotteiden mikrorakenteen tarkastelua polarisoitua valoa käyttäen.

6.5 Tulosten tarkastelu

Tässä kappaleessa vertaillaan eri luotettavuustesteissä saatuja tuloksia toisiinsa ja esitetään tuloksista johtopäätöksiä. Taulukkoon 9 on koottu yhteenveto eri testien tuloksista sekä muutoksista juotteissa.

Taulukko 9: Yhteenvedo testien tuloksista sekä muutoksista juotteessa.

	Ei esikäsittelyä		Hehkutus		DC-virtarasitus	
Juotteen rakenne	Dendriittiset tinasellit, eutektisella alueella on tinamatriisissa pieniä Cu_6Sn_5 ja Ag_3Sn – partikkeleita		Karkeutunut. Sellirakenne muuttunut pyöreämmäksi, eutektista rakennetta on vähemmän nähtävissä. IMC-erkaumat yhdistyneet suuremmiksi.		Karkeutunut, mikrorakenne on hyvin hienojakoinen. Niellussa sellirakenne kadonnut, lähteessä yhä nähtävissä. Lähteessä poikkeuksellisen suuri määrä Cu_6Sn_5 –erkaumia.	
IMC-kerrokset	Muodoltaan hyvin epätasainen		Muodoltaan jonkin verran tasaisempi.		Muodoltaan selvästi tasaisempi.	
Paksuus (μm)	Nielu	Lähde	Nielu	Lähde	Nielu	Lähde
Cu_6Sn_5	2,1	1,8	2,2	2,0	3,5	1,6
Cu_3Sn	-	-	1,6	-	1,7	-
IMC kok.	2,1	1,8	3,8	2,0	5,2	1,6
	Lämpösyklitesti		Hehkutus + lämpösyklitesti		DC-virtarasitus + lämpösyklitesti (1300s)	
Elinikä	6850		7067		>8000, ei vikaantunut	
Keskih.	778 (11 %)		115 (2 %)			
Murtuma	Lähdeliitoksen bulkissa, seuraa raerajoja		Lähdeliitoksen komponentin puoleisen rajapinnan lähellä, seuraa raerajoja		Särö lähdeliitoksen komponentin puoleisen rajapinnan lähellä, seuraa raerajoja	
Juotteen rakenne	IMC -partikkelit kerääntyneet suuremmiksi erkaumiksi. Sellirakenne kadonnut, koko liitos uudelleen kiteytynyt.		IMC –erkaumat suurentuneet, sellirakenne kadonnut, koko liitos uudelleen kiteytynyt. Juote karkeutuneempi kuin esikäsittelemättömässä.		Juotematriisi edelleen hienojakoisempi ja IMC-partikkelit keskimäärin pienempiä kuin muissa käsittelyryhmissä 1300 syklin jälkeen. Liitos suurelta osin uudelleen kiteytynyt, suuri määrä Cu_6Sn_5 –erkaumia.	
	Pudotustesti		Hehkutus + pudotustesti		DC-virtarasitus + pudotustesti	
Elinikä	2571		1149		1109	
Keskih.	2826 (110 %)		1006 (88 %)		380 (34 %)	
Murtuma	Nieluliitoksessa, lähellä juotteen ja IMC-kerroksen rajapintaa juotteen puolella		Nieluliitoksessa, etenee puoliksi juotteen ja Cu_6Sn_5 -kerroksen välillä rajapintaa pitkin		Nieluliitoksessa, kulkee bulkkijuotteessa kaukana rajapinnoista	
	Tärytystesti		Hehkutus + tärytystesti		DC-virtarasitus + tärytystesti	
Elinikä	118		79		92	
Keskih.	83 (70 %)		77 (97 %)		80 (87 %)	
Murtuma	Sama kuin pudotustestissä		Sama kuin pudotustestissä		Sama kuin pudotustestissä	

Lämpösyklitestissä komponentin vikaantuminen aiheutui lähdeliitoksen murtumisesta uudelleenkiteytyneiden alueiden raerajoja pitkin. Nielujuotteisiin tuli testin aikana vain pieniä säröjä. Pudotus- ja tärytystestissä puolestaan vikaantumisen aiheutti nielujuotteen murtuminen, kun lähdejuotteet selvisivät pääosin pienillä säröillä. Lämpösyklitestin ja mekaanisten testien välinen ero vikaantumispaikassa johtunee komponentin geometriasta ja juoteliitosten kokoeroista. Lämpösyklitestissä suurikokoinen lähdeliitos ei pääse lämpötilan muuttuessa laajenemaan piirilevyn ja komponentin välissä yhtä vapaasti kuin nielujuote, jonka kontaktialueet ovat huomattavasti pienemmät. Lähdeliitokseen aiheutuu siten voimakkaampia leikkaus-, veto- ja puristusjännityksiä, jotka aiheuttavat juotteen uudelleenkiteytymisen. Mekaanisissa testeissä sen sijaan juotteisiin kohdistuva kuormitus aiheutuu piirilevyn taipumisesta ylös ja alas. Tällöin komponentin keskellä oleva lähdeliitos on eniten suojassa taipumiselta, kun reunalla sijaitsevaan nieliitokseen kohdistuu voimakkain rasitus.

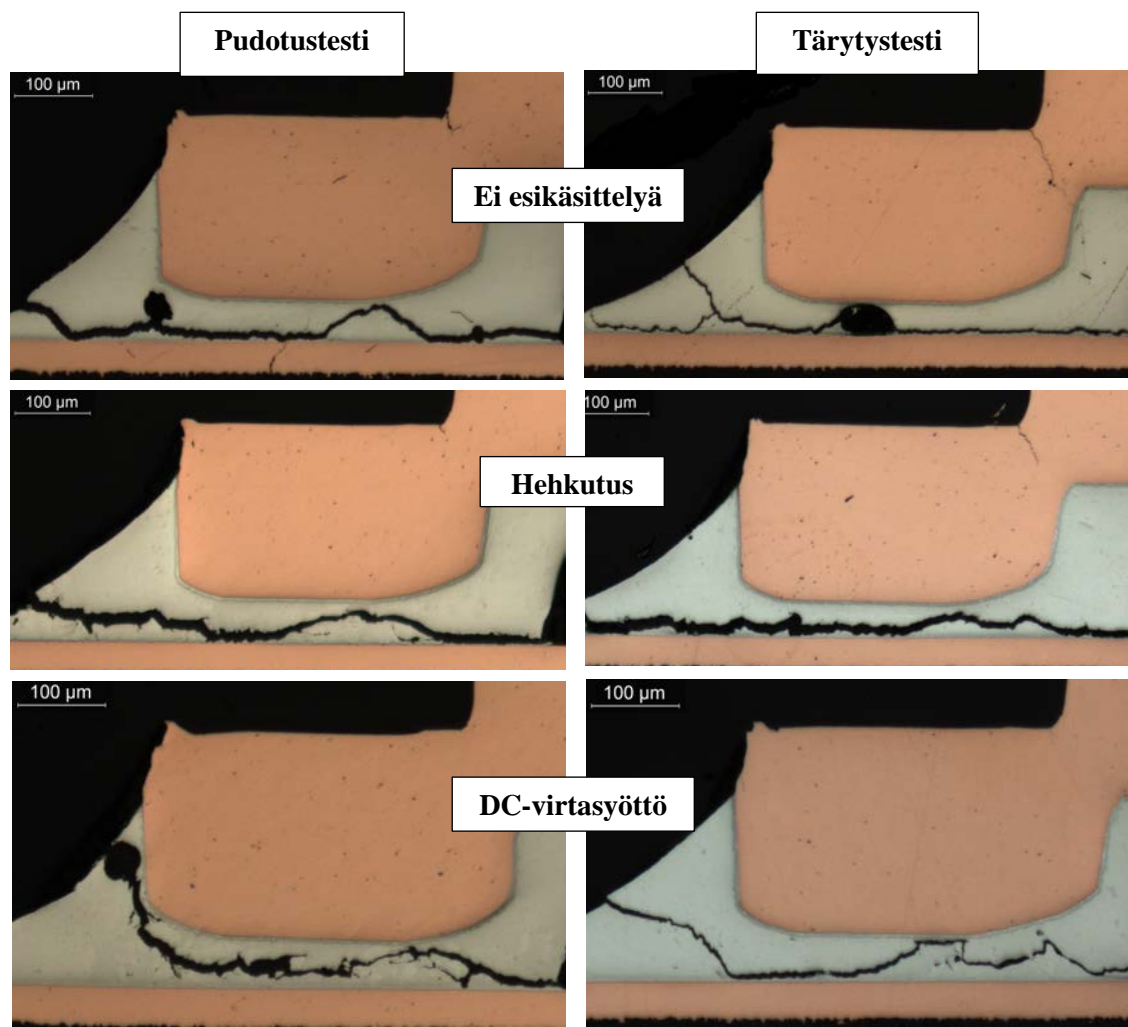
Lämpösyklitestissä esikäsittelymättömien ja hehkutettujen testikokoonpanojen luotettavuuden välillä ei havaittu merkittävää eroa. Testikappaleiden vikaantuminen aiheutui lähdejuotteen murtumisesta uudelleenkiteytyneiden alueiden raerajoja pitkin. DC-virtarasitetut näytteet sen sijaan osoittautuivat muita kestävämmiksi. 1300 syklin jälkeen lähdejuotteen sellirakenne oli kaikissa näytteissä katoamassa tai kadonnut, IMC-erkaumat olivat kerääntyneet suuremmiksi partikkeleiksi ja suuri osa liitoksesta oli uudelleenkiteytynyt. DC-virtarasitetussa näytteessä mikrorakenteen muutos ei kuitenkaan ollut edennyt yhtä pitkälle kuin muissa; rakenne oli edelleen hyvin hienojakoinen ja metallienvälisten yhdistepartikkelien koko näytti olevan keskimäärin muita pienempi lukuun ottamatta virran ahtauman alueen suuria erkaumia.

Koska suuret metallienväliset yhdistepartikkelit ovat suotuisia ydintymispaikkoja uusille kiteille, ne oletettavasti vahvistavat uudelleenkiteytymistä. IMC-partikkelit myös menettävät kasvaessaan lujittavan vaikutuksensa vähitellen, jolloin juote pehmenee ja uudelleenkiteytymiseen ajavaa plastista työtä aiheutuu rakenteeseen enemmän joka sykllillä. Siten DC-virtarasitetun juotteen voisi odottaa uudelleenkiteytyneen virran ahtauman alueella nopeasti, mutta muualla liitoksessa muita esikäsittelyryhmiä hitaammin. Liitos kuitenkin näytti olevan suurelta osin kiteytynyt samoin kuin muutkin liitokset. Syy DC-virtarasitetettujen liitosten paremmalle kestävyydelle tarvitsisi siten vielä lisätutkimusta.

Pudotus- ja tärytystestin tulokset havaittiin keskenään huomattavan samankaltaisiksi. Kummassakaan testissä ei esikäsittelyillä havaittu olevan vaikutusta juotteiden luotettavuuteen tutkimuksen virhetekijöihin nähden - tulosten keskihajonta tosin oli huomattava kaikissa esikäsittelyryhmissä. Aiemmissa tutkimuksissa juotteen mekaanisen rasituksen keston on todettu heikkenevän isothermisen vanhennuksen [32] ja DC-virtakäsittelyn [35, 36] seurauksena. Tämän työn tulosten suuren hajonnan takia ei asiaan voida luotettavasti ottaa kantaa.

Poikkileikkausnäytteitä tarkastelemalla havaittiin kuitenkin eri esikäsittelytyyppien vikaantuminen hieman toisistaan poikkeavaksi, kummassakin testissä samalla tavalla. Pudotus- ja tärytystestiä ei kuitenkaan voi suoraan verrata toisiinsa, koska kuormitus on testeissä erilainen. Molemmissa piirilevy saadaan värähtelemään ylös ja alas, mutta tärytyksessä levyn taipuma pyritään pitämään vakiona, kun pudotustestissä se vaimenee pudotuskun jälkeen. Lisäksi pudotustestissä iskupulssi on tavallisesti huomattavasti voimakkaampi kuin tärytyksessä – tämän työn tärytystestin iskupulssin kiihtyvyys oli suurimmillaan vain 1,7 prosenttia pudotustestin pulssin huippukiihtyvyydestä. Piirile-

vyn kokemat venymät pudotus- ja tärytystestissä eivät kuitenkaan olleet kovin kaukana toisistaan. Testien venymäprofiileista kuvista 34 ja 36 havaitaan, että pudotustestissä venymä on tärytyksen venymään verrattuna vain noin kaksinkertainen. Tämä selittänee testien tulosten samankaltaisuuden. Kuvassa 55 esitetään vertailu nielujuotteen tyypillisestä murtumapolusta eri esikäsittelyryhmissä pudotus- ja tärytystestin jälkeen.



Kuva 55: Murtumapolku nielujuotteessa eri esikäsittelyryhmissä. Vasemmalla on esikäsittelyryhmän tyypillinen juote pudotustestin ja oikealla tärytystestin jälkeen.

Sekä pudotus- että tärytystestin esikäsittelemättömässä näytteessä murtuma kulki bulkkijuotteessa lähellä rajapintoja, hehkutetussa näytteessä sen sijaan murtuma eteni jo puoliksi juotteen ja Cu_6Sn_5 :n välistä rajapintaa pitkin ja DC-virtarasitetussa näytteessä puolestaan murtuma kulki lähes ainoastaan bulkkijuotteessa kaukana rajapinnoista. Mekaanisen iskun aikaansaama särö etenee tyypillisesti IMC-kerroksissa tai juotteen ja IMC-kerroksen rajapinnalla. DC-virtarasitetun näytteen murtumareitti oli tästä poikkeava; ilmeisesti juotteen kestävyys oli heikentynyt.

Juotteen mikrorakenteen karkeutuminen näyttäisi vaikuttavan murtuman kulkureittiin juoteliitoksessa. Esikäsittelemättömän näytteen eutektisessa sellirakenteessa murtuma pysyy aivan metallienvälisen yhdistekerroksen ja bulkin välisen rajapinnan lähellä, vaikka ei kuljekaakaan huomattavan epätasaista rajapintaa pitkin. Hehkutuksessa ja DC-virta-asi-utuksessa juotteen mikrorakenne karkeutui, ja karkeutumisen tiedetään pehmentävän juotetta [68, 69]. Oletettavasti tämä sai murtuman kulkemaan juotteessa IMC-kerrosten sijaan.

7 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutkittiin elektromigraation vaikutusta Sn3.0Ag0.5Cu -juoteliitoksen luotettavuuteen mekaanisessa ja termomekaanisessa rasituksessa. Voimakkaassa virtarasituksessa juotteiden luotettavuuteen vaikuttaa elektromigraation lisäksi voimakas lämpötilan nousu. Työn tavoitteena oli saada elektromigraation vaikutus esille vertaamalla suurille virrantiheyksille altistettuja kokoonpanoja hehkuttamalla esivanhennettuihin sekä kokonaan esikäsittelemättömiin testikappaleisiin. Testikokoonpanoja esivanhennettiin 750 tuntia joko hehkuttamalla 125 °C:ssa tai syöttämällä komponentille 45 ampeerin DC-virtaa. Tällä virransuuruudella komponentit lämpenivät 125 °C:een, eikä ulkoista lämmitystä käytetty. Osalle testikokoonpanoista ei tehty esivanhennusta. Tämän jälkeen juoteliitosten kestävyyttä arvioitiin luotettavuustesteillä: kustakin esikäsitteilyryhmästä otettiin kokoonpanoja lämpösyklaukseen, pudotustestiin, ja täytykseen. Jokaisesta esikäsitteilyryhmästä otettiin myös näyte referenssiksi, eikä niille siis tehty luotettavuustestiä.

Luotettavuustestien tulosten perusteella näyttäisi siltä, että esikäsitteily DC-virtarasituksella vaikuttaa juoteliitoksen termomekaanisen rasituksen kestoon. Esikäsittelemättömien ja hehkutettujen testikokoonpanojen vikaantumisenopeuden välillä ei havaittu merkittävää eroa, ja vikaantuminen aiheutui lähdejuotteen murtumisesta uudelleenkiteytyneiden alueiden raerajoja pitkin. DC-virtarasitetut näytteet sen sijaan osoittautuivat muita kestävämmiksi – yksikään näyte ei vikaantunut testissä. Uudelleenkiteytymistä lukuun ottamatta mikrorakenteen muutos kohti sellirakenteen katoamista ja suurenväisiä IMC-partikkeleita näytti edenneen hitaammin DC-virtarasitetussa näytteessä. Syy paremmalle termomekaanisen rasituksen kestolle liittyyneen DC-virtarasitetun liitoksen poikkeavaan mikrorakenteeseen, mutta asian selvittäminen vaatii lisätutkimuksia.

Esikäsitteilyn vaikutusta juotteen mekaaniseen rasituksen kestoon puolestaan ei havaittu tutkimuksen virherajoihin nähden – tulosten hajonta tosin oli huomattava kaikissa esikäsitteilytyypeissä. Eri esikäsitteilyn kokeneilla näytteillä näytti kuitenkin olevan eroja vikaantumisessa, mikä saattaa johtua juotteen mikrorakenteen karkeutumisesta esikäsitteilyissä. Sekä pudotus- että tärytystestin esikäsittelemättömän näytteen eutektisessa sellirakenteessa murtuma pysyy aivan metallienvälisen yhdistekerroksen ja bulkin välisen rajapinnan lähellä. Hehkutetussa näytteessä murtuma etenee osaksi tasaisempaa juotteen ja Cu₆Sn₅ -kerroksen välistä rajapintaa pitkin ja osaksi hehkutuksessa pehmenneessä bulkkijuotteessa. DC-virtarasitetun näytteen oletettavasti pehmenneessä juotteessa murtuma etenee bulkissa kaukana rajapinnoista.

Työssä päästiin etenemään suunnitelmien mukaan ja tulokset vastasivat pääosin asetettuihin tavoitteisiin. Työn DC-virtarasitetuissa testikokoonpanoissa havaittiin elektromigraation tyypilliset vaikutukset juoteliitoksissa. Metallinvälisen yhdistekerroksen kasvu oli kiihtynyt anodirajapinnalla, alusmetallointia oli liuennut katodilla ja virran ahtautuminen oli aiheuttanut juotteessa paikallista IMC-erkaumien kasautumista. Elekt-

romigraatiota oli siis selvästi tapahtunut työssä käytetyllä suhteellisen alhaisella virrantiheydellä (lähteessä 1960 A/cm^2 ja nielussa 1351 A/cm^2). Lisäksi juotteen mikrorakenne havaittiin DC-virtarasituksen jälkeen erilaiseksi kuin esikäsittelemättömässä ja hehkutetussa näytteessä. Juotteen rakenne oli hyvin hienojakoinen ja sellirakenne oli kadonnut tai katoamassa, ja juotematriisissa olevat metallinväliset yhdiste-erkaumat olivat pienempiä kuin muissa esikäsitteilyryhmissä lukuun ottamatta virran ahtaumakohtia. IMC-kerrokset olivat pääosin selvästi tasaisemmat ja paksummat.

Elektromigraation vaikutus juoteliitoksen mekaanisen rasituksen kestoon jäi tässä työssä osittain ratkaisematta pudotus- ja tärytystestin tulosten suuren hajonnan takia. Olisikin mielenkiintoista tehdä kyseiset luotettavuustestit huomattavasti suuremmalla näytemäärällä, jolloin tuloksiin voitaisiin saada pienemmät virherajat ja eroavaisuuksia eri esikäsitteilyryhmien välille. Pudotus- ja tärytystestin tulokset todettiin sen verran samanlaisiksi, että todennäköisesti vain toisen testin toistaminen riittäisi ratkaisemaan asian. Tulos DC-virtarasituksen mahdollisesta vaikutuksesta termomekaanisen rasituksen keston edistämisessä on myös hyvin mielenkiintoinen, sillä elektromigraatiota pidetään lähinnä epätoivottuna ilmiönä. Asia vaatii kuitenkin lisätutkimuksia.

Tämän työn tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa elektromigraation vaikutusta juoteliitoksen luotettavuuteen elektroniikkalaitteiden tyypillisessä käyttöympäristössä. Korkean virtarasituksen vaikutuksista juoteliitokseen löytyy suhteellisen hyvin tutkimustietoa, mutta korkea virrantiheys ei ole ainoa rasitus, jolle laitteet käyttöympäristössään tavallisesti altistuvat. Yhdistämällä muita elektroniikkalaitteiden kokemia tyypillisiä rasiustiloja voimakkaaseen virtarasitukseen saadaan paremmin todellisuutta vastaavaa tietoa elektromigraation vaikutuksesta laitteiden luotettavuuteen. Eduistaan huolimatta yhdistelmätestejä ei ole otettu laajalti käyttöön elektroniikkateollisuudessa, koska ne ovat huomattavasti monimutkaisempia kuin perinteiset paljon tutkitut yhden parametrin testit. Tämän työn tuloksia voidaankin hyödyntää myös yhdistelmätestien suunnittelussa, kun halutaan ottaa huomioon käyttökohteen kokemat korkeat virrantiheydet.

Viitteet

- [1] Viswanadham, P. ja Singh, P. *Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages*. New York, Chapman and Hall, 1998.
- [2] Visvanadham, P., Dunford, S. O. ja Kivilahti, J. K. "Reliability aspects of lead-free solders in electronic assemblies". Teoksessa: Puttlitz, K. J. ja Stalter, K. A. (toim.) *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. New York, Marcel Dekker Inc., 2004, s. 769-825.
- [3] Lou, H., Qu, X., Chen, Z., Wang, J., Lee, T. ja Wang, H. "Lifetime assessment of solder joints of BGA package in board level drop test". *6th International Conference on Electronics Packaging Technology*. Shenzhen, 30.8.-2.9.2005. s.1-5.
- [4] Tu, K. N. *Solder Joint Technology. Materials, Properties, and Reliability*. New York, Springer, 2007.
- [5] Ma, H., Suhling, J. C., Zhang, Y., Lall, P. ja Bozack, M. J. "The influence of elevated temperature aging on reliability of lead free solder joints". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 57th. Nevada, USA, 29.5.-1.6.2007, s. 653-668.
- [6] Manko, H. H. *Solders and Soldering*. New York, McGraw-Hill, 2001.
- [7] Zhang, Y., Cai, Z., Suhling, J. C., Lall, P. ja Bozack, M. J. "The effects of aging temperature on SAC solder joint material behavior and reliability". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 58th. Florida, 27.-30.5.2008, s. 99-112.
- [8] Alam, M. O., Chan, Y. C. ja Tu, K. N. "Effect of 0.5 wt % Cu in Sn-3.5%Ag Solder on the Interfacial Reaction with Au/Ni Metallization". *Chemistry of Materials*, 2003, vol. 15, nro 23, s. 4340-4342.
- [9] Pang, J. H. L., Prakash, K. H. ja Low, T. H. "Isothermal and thermal cycling aging on IMC growth rate in pb-free and pb-based solder interfaces". *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference*, 9th, 1.-4.5.2004, vol. 2 s. 109-115.

- [10] Mattila, T. T. "Reliability of High-Density Lead-Free Solder Interconnections Under Thermal Cycling and Mechanical Shock Loading". Väitöskirja, Teknillinen Korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Espoo, 2005.
- [11] Mattila, T. T., Laurila, T. ja Kivilahti, J. K. "Metallurgical factors behind the reliability of high-density lead-free solder interconnections". Teoksessa: Suhir, E., Wong, C. P. ja Lee, Y. C. (toim.) *Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging*. New York, Springer, 2006, s. 313 - 350.
- [12] Mattila, T. T., Mueller, M., Paulasto-Kröckel, M. ja Wolter, K. "Failure mechanism of solder interconnections under thermal cycling conditions". *Proceedings - Electronics System Integration Technology Conference*, Berlin, 13.-16.9.2010, s.1-8.
- [13] Glazer, J. "Reliability of printed circuit assemblies". Teoksessa: Coombs, C. F. (toim.) *Coombs' Printed Circuit Handbook*. 5. painos. New York, McGraw-Hill, 2001.
- [14] Mattila, T. T., Suotula, L. ja Kivilahti, J. K. "Replacement of the drop test with the vibration test - the effect of test temperature on reliability". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference, 58th*, Florida, USA, 27.-30.5.2008, s. 629-637.
- [15] Marjamäki, P. "Vibration Test as a New Method for Studying the Mechanical Reliability of Solder Interconnections under Shock Loading Conditions". Väitöskirja, Teknillinen Korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Espoo, 2007.
- [16] Chen, C., Tong, H. M. ja Tu, K. N. "Electromigration and thermomigration in Pb-free flip-chip solder joints". *Annual Review of Materials Research*, 2010, vol. 40, s. 531-555.
- [17] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry. "JESD22-A104D: Temperature Cycling". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2009.
- [18] Hall, P. M. "Forces, moments, and displacements during thermal chamber cycling of leadless ceramic chip carriers soldered to printed boards". *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1984, vol. 7, nro 4, s. 314-327.
- [19] Hall, P. M. "Creep and stress relaxation in solder joints of surface-mounted chip carriers". *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1987, vol. 10, nro 4, s. 556-565.
- [20] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry, "JESD22-A103D: High Temperature Storage Life". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2010.
- [21] Zhao, J., Liu, F., Zhou, X., Zhou, H., Jing, J. ja Zhao, M. "Improvement of JEDEC drop test in SJR qualification through alternative test board design". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference, 57th*, Nevada, 29.5-1.6.2007, s. 946-950.

- [22] Caers, J. F. J. M., Wong, E. H., Seah, S. K. W., Zhao, X. J., Selvanayagam, C. S., Van Driel, W. D., Owens, N., Leoni, M., Tan, L. C., Eu, P. L., Lai, Y-S. ja Yeh, C-L. "A study of crack propagation in pb-free solder joints under drop impact". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, Florida, 27.-30.5.2008, s. 1166-1172.
- [23] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry. "JESD22-B111: Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2003.
- [24] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry. "JESD22-B104C: Mechanical Shock". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2004.
- [25] Mattila, T. T. ja Paulasto-Kröckel, M. "Toward comprehensive reliability testing of electronic component boards". *11th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, Bordeaux, 26.-28.4.2010, s.1-13.
- [26] Thermotron Industries. "Fundamentals of electrodynamic vibration testing handbook". 2006.
- [27] Gomes, H. M., Santos Gaspareto, D., Souza Ferreira, F. ja Thomas, C. A. K. "A simple closed-loop active control of electrodynamic shakers by acceleration power spectral density for environmental vibration tests". *Experimental Mechanics*, 2008, vol. 48, nro 5, s. 683-692.
- [28] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry. "JESD22-B103B: Vibration, Variable Frequency". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2006.
- [29] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry, "JEP154: Guideline for Characterizing Solder Bump Electromigration Under Constant Current and Temperature Stress". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2008.
- [30] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry. "JESD61A.01: Isothermal Electromigration Test Procedure". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2007.
- [31] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry. "JESD22-A108D: Temperature, Bias and Operating Life". *JEDEC Solid State Technology Association*, 2005.
- [32] Chauhan, P., Mueller, M., Osterman, M. ja Pecht, M. "Impact of thermal aging on the thermal fatigue durability of pb-free solder joints". *Electronics System-Integration Technology Conference, 3rd*, Berlin, 13.-16.9.2010, s.1-10.

- [33] Xu, L., Pang, J. H. L. ja Che, F. "Impact of thermal cycling on Sn-Ag-Cu solder joints and board-level drop reliability". *Journal of Electronic Materials*, 2008, vol. 37, nro 6, s. 880-886.
- [34] Choubey, A. "Microstructural changes under isothermal aging and their influence on thermal fatigue reliability for tin-lead and lead-free solder joints, including microstructural changes under isothermal aging in mixed solder joints". Dissertation, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering, 2007.
- [35] Xu, L. ja Pang, J. H. L. "Effect of thermal and electromigration exposure on solder joint board level drop reliability". *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference*, 8th, 6.-8.2006, s. 570-575.
- [36] Ren, F. "Polarity Effect of Electromigration on Mechanical properties of Lead-Free Solder Joints." Dissertation, University of California, Los Angeles, 2006.
- [37] Karppinen, J. "Tehosyklaus- ja lämpöshokkitestauksen vaikutukset lyijyllisiin sekä lyijyttömiin komponenttiliitoksiin." Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Espoo, 2006.
- [38] Liu, C. Y., Chen, C. ja Tu, K. N. "Electromigration in Sn-Pb solder strips as a function of alloy composition". *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, nro 10, s. 5703-5709.
- [39] Lloyd, J. R., Tu, K. N. ja Jaspal, J. "The physics and materials science of electromigration and thermomigration in solders". Teoksessa: Puttlitz, K. J. ja Stalter, K. A. (toim.) *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. New York, Marcel Dekker Inc., 2004, s. 827-850.
- [40] Xu, L. ja Pang, J. H. L. "Combined thermal and electromigration exposure effect on SnAgCu BGA solder joint reliability". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 56th, 2006, California, s. 1154-1159.
- [41] Laurila, T., Vuorinen, V., Mattila, T., Turunen, M., Paulasto-Kröckel, M., ja Kivilahti, J. *Interfacial Compatibility in Microelectronics – Moving Away from the Trial and Error Approach*. London, Springer, 2012.
- [42] Kraft, O., Sanchez Jr., J. E., Bauer, M. ja Arzt, E. "Quantitative analysis of electromigration damage in Al-based conductor lines". *Journal of Materials Research*, 1997, vol. 12, nro.8, s. 2027-2037.
- [43] Wang, L., Wu, F., Zhang, J., An, B. ja Wu, Y. "Effects of electromigration on IMC evolution in pb-free solder joints". *Proceedings of International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability*, Shanghai, 27.-30.4.2004, s. 47-49.

- [44] Shao, T. L., Chen, Y. H., Chiu, S. H. ja Chen, C. "Electromigration failure mechanisms for SnAg3.5 solder bumps on Ti/Cr-Cu/ Cu and Ni(P)/Au metallization pads". *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 96, nro 8, s. 4518-4524.
- [45] Chen, C. M. ja Chen, S. W. "Electromigration effect upon the Sn-0.7 wt% Cu/Ni and Sn-3.5 wt% Ag/Ni interfacial reactions". *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 90, nro 3 s. 1208-1214.
- [46] Shao, T. L., Chen, I. H. ja Chen, C. "Electromigration failure mechanism of Sn96.5Ag3.5 flip-chip solder bumps". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 54th, 1.-4.6.2004, s. 979-982.
- [47] DiGiacomo, G. "Reliability of die-level interconnections". Teoksessa: Puttlitz, K. J. ja Totta, P. A. (toim.) *Area Array Interconnection Handbook*. Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 2001, s. 500-548.
- [48] Rinne, G. A. "Electromigration in SnPb and pb-free solder bumps". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 54th, 1.-4.6.2004, s. 974-978.
- [49] Lee, C. C., Lee, C. C. ja Chiang, K. N. "Electromigration characteristic of SnAg3.0Cu0.5 flip chip interconnection". *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2010, vol. 33, s. 189-195.
- [50] Lu, Y-D., He, X-Q., En, Y-F. ja Wang, X. "Failure mechanism of Sn3.0Ag0.5Cu flip-chip solder joints under electric current stress". *Proceedings of the International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, 16th, Jiangsu, 6.-10.7.2009, s. 406-409.
- [51] Liang, S. W., Chang, Y. W. ja Chen, C. "Effect of Al-trace dimension on Joule heating and current crowding in flip-chip solder joints under accelerated electromigration". *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, nro 17.
- [52] Lai, Y. S. ja Kao, C. L. "Characteristics of current crowding in flip-chip solder bumps". *Microelectronics Reliability*, 2006, vol. 46, s. 915-922.
- [53] Choi, W. J., Yeh, E. C. C. ja Tu, K. N. "Mean-time-to-failure study of flip chip solder joints on Cu/Ni(V)/Al thin-film under-bump-metallization". *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, nro 9, s. 5665-5671.
- [54] Zhang, L., Ou, S., Huang, J., Tu, K. N., Gee, S. ja Nguyen, L. "Effect of current crowding on void propagation at the interface between intermetallic compound and solder in flip chip solder joints". *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, nro 1.
- [55] Lai, Y-S., Chiu, Y-T., ja Chen, J. "Electromigration reliability and morphologies of cu pillar flip-chip solder joints with cu substrate pad metallization". *Journal of Electronic Materials*, 2008, vol. 37, nro 10, s. 1624-1630.

- [56] Nah, J-W., Suh, J. O., Tu, K. N., Yoon, S. W., Rao, V. S., Kripesh, V. ja Hua, F. "Electromigration in flip chip solder joints having a thick Cu column bump and a shallow solder interconnect". *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, nro 12.
- [57] Yu, J. Anand, A., Mui, Y. C., Srinivasan, P. ja Master, R. "Reliability study on copper pillar bumping with lead free solder". *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, 9th*, Singapore, 10.-12.12.2007, s. 618-622.
- [58] Xu, L., Liang, S. W., Xu, D., Han, J-K., Liang, J. ja Tu, K. N. "Electromigration failure with thermal gradient effect in SnAgCu solder joints with various UBM". *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference, 59th*, California, 26.-29.5.2009, s. 909-913.
- [59] Nah, J-W., Chen, K., Tu, K. N., Su, B-R. ja Chen, C. "Mechanism of electromigration-induced failure in flip-chip solder joints with a 10- μ m-thick Cu under-bump metallization". *Journal of Electronic Materials*, 2007, vol. 22, nro 3, s. 763-769.
- [60] Liang, S. W., Chang, Y. W. ja Chen, C. "Relieving hot-spot temperature and current crowding effects during electromigration in solder bumps by using Cu columns". *Journal of Electronic Materials*, 2007, vol. 36, nro 10, s. 1348-1354.
- [61] Vuorinen, V., Karppinen, J. S., Laurila, T., Paul, A. ja Paulasto-Kröckel, M. "On the role of electromigration in power cycling tests". *Proceedings - Electronics System Integration Technology Conference, 3rd*, Berlin, 13.-16.9.2010, s.1-7.
- [62] Alam, M. O., Bailey, C., Wu, B. Y., Yang, D. ja Chan, Y. C. "High current density induced damage mechanisms in electronic solder joints: A state-of-the-art review". *Proceedings of International Symposium on High Density Packaging and Microsystem Integration*, Shanghai, 26.-28.6.2007, s.1-7.
- [63] Laurila, T., Mattila, T., Vuorinen, V., Karppinen, J., Li, J., Sippola, M. ja Kivilahti, J. K. "Evolution of microstructure and failure mechanism of lead-free solder interconnections in power cycling and thermal shock tests". *Microelectronics Reliability*, 2007, vol. 47, nro 7, s. 1135-1144.
- [64] Alam, M. O., Wu, B. Y., Chan, Y. C. ja Tu, K. N. "High electric current density-induced interfacial reactions in micro ball grid array (μ BGA) solder joints". *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, s. 613-621.
- [65] Gan, H. ja Tu, K. N. "Polarity effect of electromigration on kinetics of intermetallic compound formation in Pb-free solder V-groove samples". *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, nro 6, s. 1-10.
- [66] Laurila, T., Karppinen, J., Vuorinen, V., Paul, A. ja Paulasto-Kröckel, M. "Effect of constant and cyclic current stressing on the evolution of intermetallic compound layers". *Journal of Electronic Materials*, 2011, vol. 40, nro 7, s. 1517-1523.

- [67] International Rectifier, "IRF6716MPbF, Component Datasheet," 2006.
- [68] Vuorinen, V., Laurila, T., Mattila, T., Heikinheimo E. ja Kivilahti, J. K. "Solid state reactions between Cu(Ni) alloys and Sn". *Journal of Electronic Materials*, 2007, vol. 36, nro 10, s. 1355-1362.
- [69] Peng, W. ja Marques, M. E. "Effect of Thermal Aging on Drop Performance of Chip Scale Packages with SnAgCu Solder Joints on Cu Pads". *Journal of Electronic Materials*, 2007, vol. 36, nro 12, s. 1679-1690.
- [70] Dompierre, B., Aubin, V., Charkaluk, E., Filho, W. C. M. ja Brizoux, M. "Cyclic mechanical behaviour of Sn3.0Ag0.5Cu alloy under high temperature isothermal ageing". *Materials Science and Engineering: A - Structural Materials*, 2011, vol. 528, nro 13, s. 4812-4818.